



OTIMIZAÇÃO DOS ARADOS E AUMENTO DA DURABILIDADE EM REGULADORAS DE LASTRO

¹M. A. S. Morais

¹Departamento de Engenharia de Material Rodante, MRS Logística S.A., Juiz de Fora, MG, Brasil

RESUMO

Este artigo técnico detalha o projeto de *re-design* das chapas de desgaste do arado central das máquinas reguladoras de lastro Plasser & Theurer modelos SSP-103 e SSP-203. O objetivo principal foi solucionar a baixa durabilidade e os consequentes altos custos de manutenção associados ao desgaste prematuro dessas peças. A solução desenvolvida incluiu a modificação da estrutura do arado com a utilização de aço SAE 1045 e a substituição das chapas de desgaste originais (soldadas e de baixa espessura) por novas chapas de maior área de contato, fixadas por elementos mecânicos e confeccionadas em aço Hardox 450. Os testes demonstraram um aumento de vida útil de até cinco vezes em comparação com o design original, resultando em ganhos significativos de disponibilidade operacional e redução de custos de manutenção.

Palavras-chave: Reguladora de Lastro, Chapa de Desgaste, Hardox 450, Manutenção Ferroviária, Durabilidade, re-design, Otimização.

1. INTRODUÇÃO

As reguladoras de lastro desempenham um papel crucial na manutenção de correção geométrica da via permanente, sendo responsáveis pela distribuição e perfilamento do lastro após a socaria. O arado central é um dos componentes de maior solicitação, atuando diretamente na movimentação do lastro. Nas reguladoras, como os modelos SSP-103 e SSP-203, as chapas de desgaste (*wear plates*) do arado central frequentemente apresentam falhas e desgaste acelerado, levando a intervenções de manutenção não programadas e paradas prolongadas do equipamento. Este projeto de *re-design* visou à introdução de uma solução de engenharia que garantisse maior resistência à abrasão e praticidade na manutenção.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O desgaste abrasivo em componentes ferroviários é um fenômeno crítico diretamente associado à interação entre materiais metálicos e partículas minerais, sendo amplamente estudado no campo da tribologia.

Segundo Hutchings (1992), o desgaste por abrasão ocorre quando partículas duras promovem remoção progressiva de material, sendo fortemente influenciado pela dureza relativa entre os corpos em contato. Materiais com elevada dureza superficial apresentam maior resistência ao desgaste, porém devem manter nível adequado de tenacidade para evitar falhas por fratura.

No contexto ferroviário, componentes como arados de reguladoras de lastro operam sob condições severas de abrasão, impacto e carregamentos cíclicos. De acordo com o ASM Handbook – *Wear and Surface Engineering*, a seleção de materiais para esse tipo de aplicação deve considerar simultaneamente resistência ao desgaste, resistência mecânica e estabilidade microestrutural.

O aço Hardox 450 é amplamente utilizado em aplicações sujeitas a desgaste abrasivo intenso devido à sua elevada dureza (≈ 450 HB) combinada com boa resistência ao impacto, conforme especificações do fabricante SSAB. Estudos indicam que a utilização de aços de alta dureza pode reduzir significativamente a taxa de desgaste volumétrico em aplicações com presença de materiais granulares.

Adicionalmente, processos de fabricação como soldagem podem influenciar significativamente o desempenho desses materiais. A formação de zonas afetadas pelo calor (ZAC) pode gerar microestruturas frágeis e tensões residuais, reduzindo a vida em serviço. Dessa forma, soluções alternativas de fixação mecânica têm sido empregadas visando preservar as propriedades originais do material e facilitar a manutenção.

Normas como ASTM G65 estabelecem metodologias para avaliação do desgaste abrasivo, sendo amplamente utilizadas para comparação de desempenho entre materiais aplicados em ambientes industriais e ferroviários.

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma solução baseada na seleção adequada de materiais e otimização do sistema de fixação, visando aumentar a durabilidade e reduzir os custos operacionais dos componentes analisados.

3. DESENVOLVIMENTO

O projeto de otimização das chapas de desgaste do arado central foi dividido em três frentes principais: análise de falha, seleção de materiais, *re-design* geométrico e de fixação.

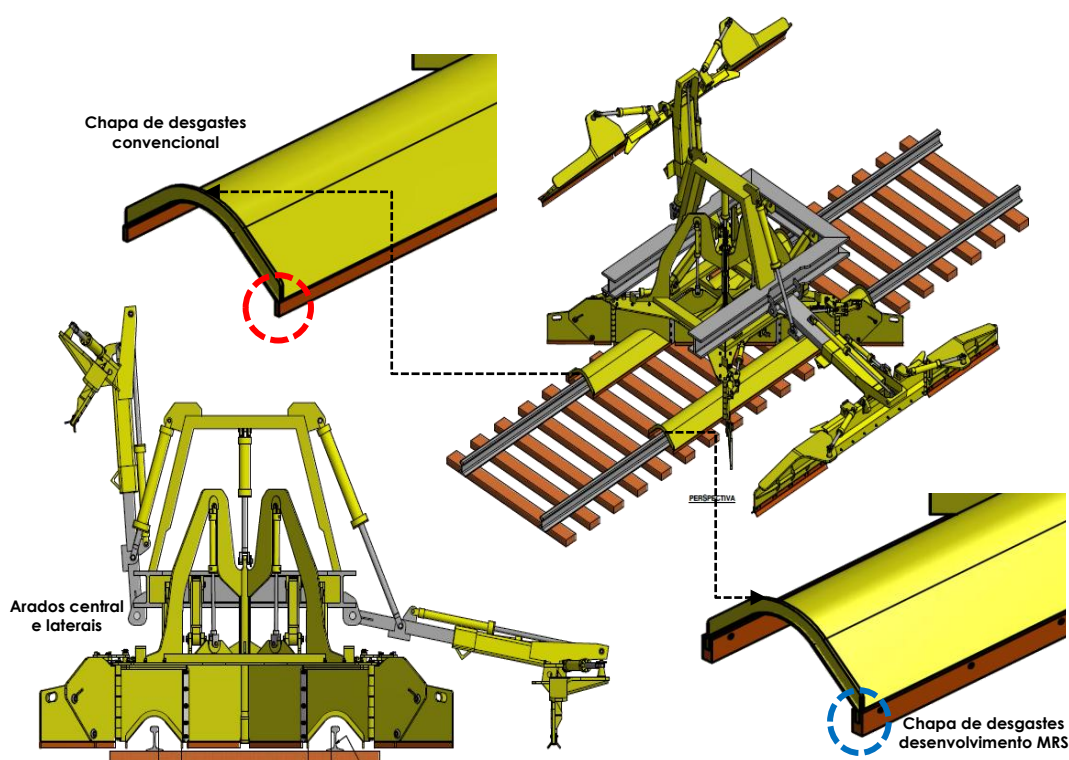


Figura 1. Novas chapas de desgastes – Arados central e laterais.

3.1. Análise de Falha e *Re-design*

As chapas de desgaste originais eram soldadas de topo nas bordas dos túneis, possuíam espessura de 12,5 mm e deviam ser confeccionadas em aço duro, Hardox 400. No entanto, como os arados eram confeccionados por terceiros e sem acompanhamento, isso acabava não ocorrendo. Como forma de redução de custo operacional a manutenção,



muitas das vezes, utilizava-se aço carbono. Isso dificultava a manutenção (exigindo corte e solda) e acelerava o desgaste. A nova solução adotou o aço SAE 1045, que suporta cerca de 47% a 60% mais carga que o 1020 antes de deformar permanentemente, para a estrutura base do arado e o aço Hardox 450 para a chapa de desgaste, ideal para alta abrasão mineral.

Anteriormente, o processo de fixação envolvia cordões de solda descontínuos que geravam Zonas Afetadas pelo Calor (ZAC) críticas. Essas regiões apresentavam microestruturas frágeis, propensas à propagação de trincas por fadiga térmica e vibração. A substituição por fixação mecânica via parafusos DIN 604 elimina essas tensões residuais térmicas, preservando a tenacidade original do aço carbono.

3.2. Otimização Geométrica e Aumento da Espessura

A espessura da nova chapa foi aumentada para 2,5 vezes a original. O redesenho priorizou uma maior área de contato para melhor distribuição de tensão e a intercambialidade da peça como chapa de desgaste.

Os resultados obtidos via modelagem de desgaste indicam que a elevação da dureza superficial e a gestão do coeficiente k no aço Hardox 450 resultaram em um volume total de desgaste de $0,03 \text{ m}^3/\text{m}$, valor significativamente inferior aos $0,12 \text{ m}^3/\text{m}$ registrados para o Hardox 400. Matematicamente, essa variação consolida uma redução de 76,5% na perda volumétrica, validando a eficácia do material na extensão da vida útil dos componentes analisados.

3.3. Análise Comparativa (Elementos Finitos): Chapa Parafusada

As simulações numéricas foram realizadas considerando as seguintes condições:

- Tipo de análise: estrutural estática linear.
- Carga aplicada: equivalente ao esforço de operação do lastro.
- Condições de contorno: fixação nas regiões de acoplamento do arado.
- Coeficiente de atrito considerado: típico de contato solo-aço ($\mu \approx 0,4-0,6$).
- Elemento utilizado: sólido tridimensional.

As hipóteses adotadas consideram comportamento elástico linear dos materiais, sem inclusão de efeitos térmicos ou plastificação, sendo adequadas para avaliação preliminar de integridade estrutural.

3.3.1 Distribuição de Tensões (Tensão de Von Mises)

A tensão máxima é de $0,0408 \text{ MPa}$. No entanto, essa tensão está concentrada nas bordas dos furos e na interface com os parafusos DIN 604, permitindo uma distribuição de carga que preserva a estrutura principal do arado.

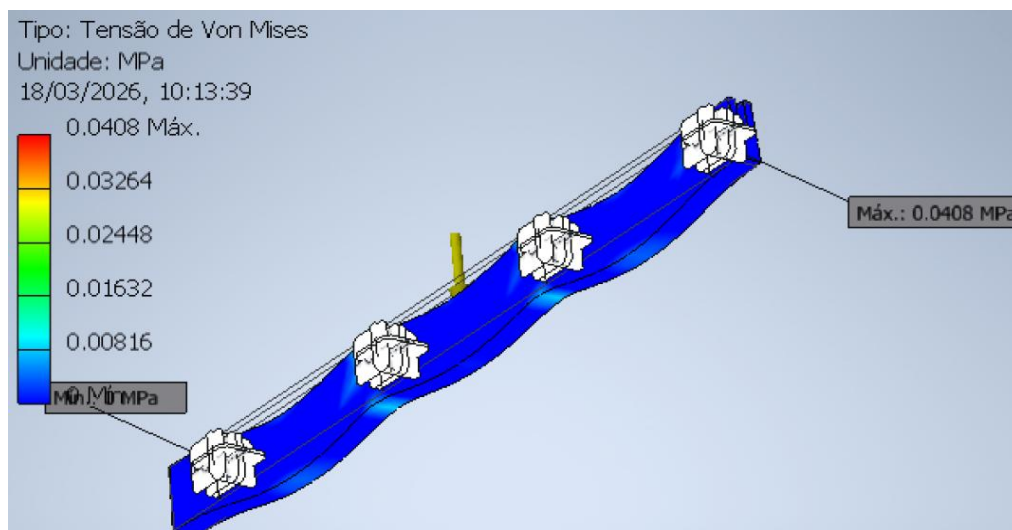


Figura 2. Novas chapas de desgastes – Tensão de Von Mises.

3.3.2 Deslocamentos e Deformações

Para uma régua de desgaste de uma reguladora de lastro, esses resultados confirmam que a carga vertical aplicada não está gerando instabilidade lateral (*buckling*) nem desalinhamento significativo no plano horizontal.

A simulação mostra que a peça está trabalhando quase que exclusivamente em regime elástico linear com uma boa margem de segurança.

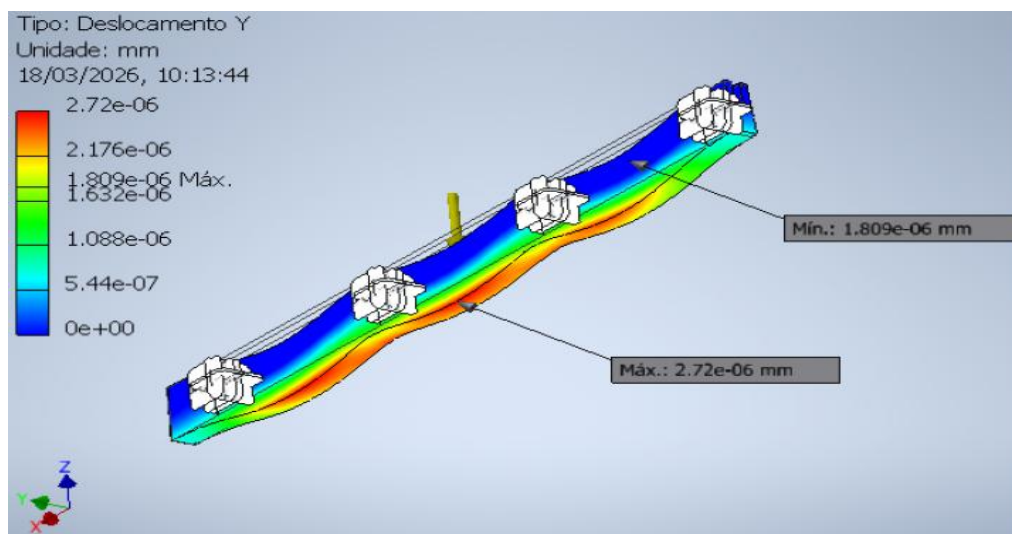


Figura 3. Novas chapas de desgastes – Deslocamentos Y.

3.3.3 Coeficiente de Segurança

A solução apresenta um coeficiente de segurança extremamente alto (15 unidades), o que garante que as chapas suportam as cargas de operação de lastro com ampla margem de sobra antes de qualquer falha plástica.

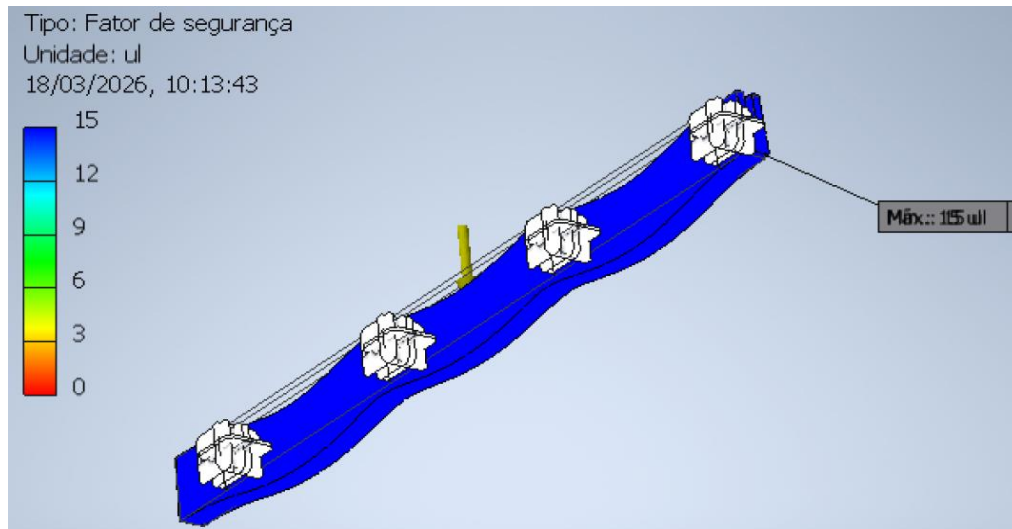


Figura 4. Novas chapas de desgastes – Fator de segurança.

3.4. Desenvolvimento do Sistema de Fixação

Foram desenvolvidas três opções de fixação mecânica para agilizar a substituição em campo sem dependência de solda:

- Opção 1: Furação para parafuso DIN 604 e porca auto travante.
- Opção 2: Furação para parafuso DIN 7991 com rosca na peça.
- Opção 3: Furação para pino elástico DIN 1481 de 16 mm.

A opção 2 foi escolhida para o projeto por conta da maior agilidade nas trocas, bem como pela fixação mais resistente.

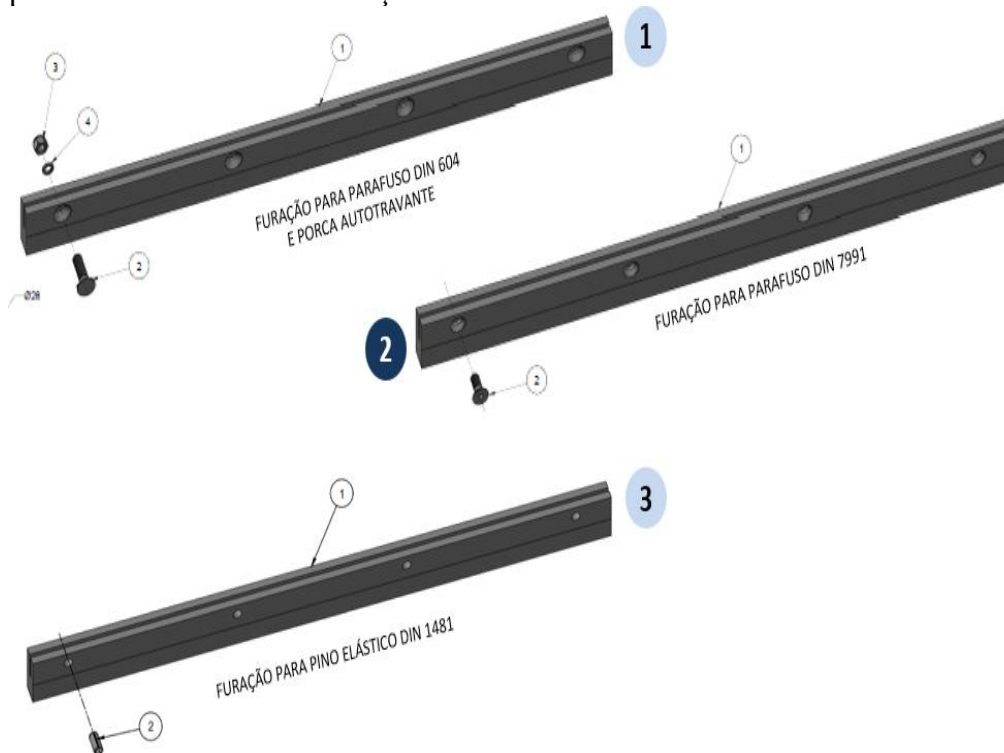


Figura 5. Foram desenvolvidas 3 opções de fixação para as novas chapas de desgastes. O objetivo é o ganho em agilidade e praticidade na substituição em campo.

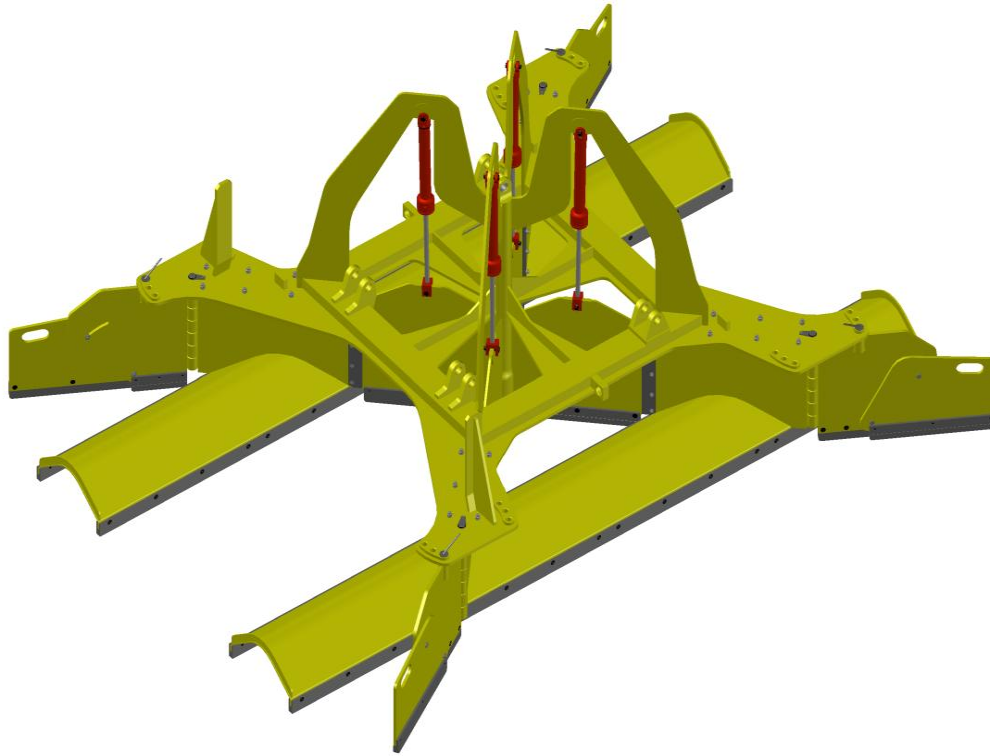


Figura 6. Utilização do aço SAE 1045 na estrutura de todo arado e Hardox 450 nas chapas de desgastes.

3.5 Caracterização dos Materiais

Foram consideradas as propriedades mecânicas típicas dos materiais utilizados, conforme normas e literatura técnica:

- **SAE 1045**
 - Resistência à tração: 570–700 MPa
 - Limite de escoamento: ~310 MPa
 - Dureza: 170–210 HB
- **Hardox 450**
 - Dureza nominal: 425–475 HB
 - Resistência à tração: ~1200–1400 MPa
 - Alta resistência ao desgaste abrasivo

Para validação da aplicação, recomenda-se:

- Ensaio de dureza (ASTM E10 / E18)
- Ensaio de tração (ASTM E8)
- Ensaio de desgaste abrasivo (ASTM G65)
- Ensaio de impacto Charpy (ASTM E23)

A escolha do Hardox 450 se justifica pela sua elevada resistência ao desgaste abrasivo, enquanto o SAE 1045 fornece boa tenacidade estrutural.



3.6. Gráficos

Comparativos das taxas de desgastes entre um arado convencional, aplicado na reguladora de lastro modelo SSP-103 (R-15), e o arado piloto do projeto, aplicado na reguladora de lastro modelo SSP-103 (R-13).

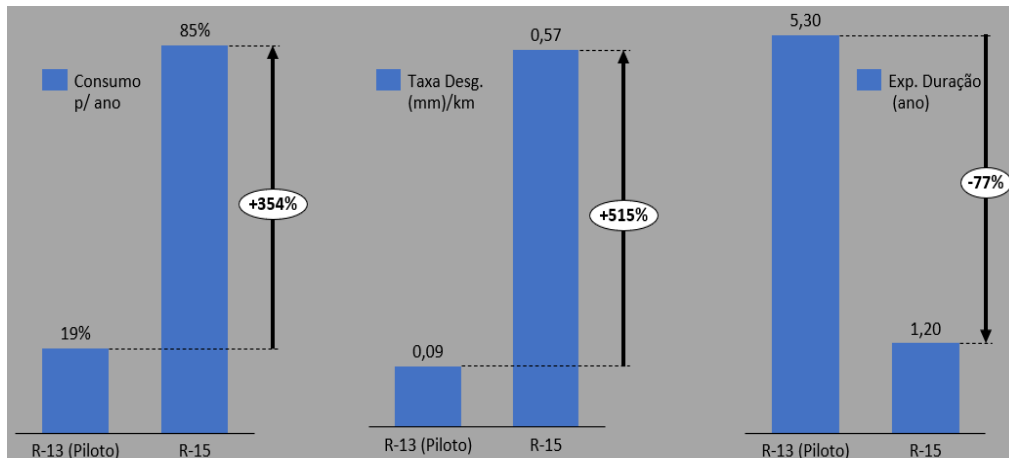


Figura 7. Gráfico comparativo das taxas de desgastes dos arados.

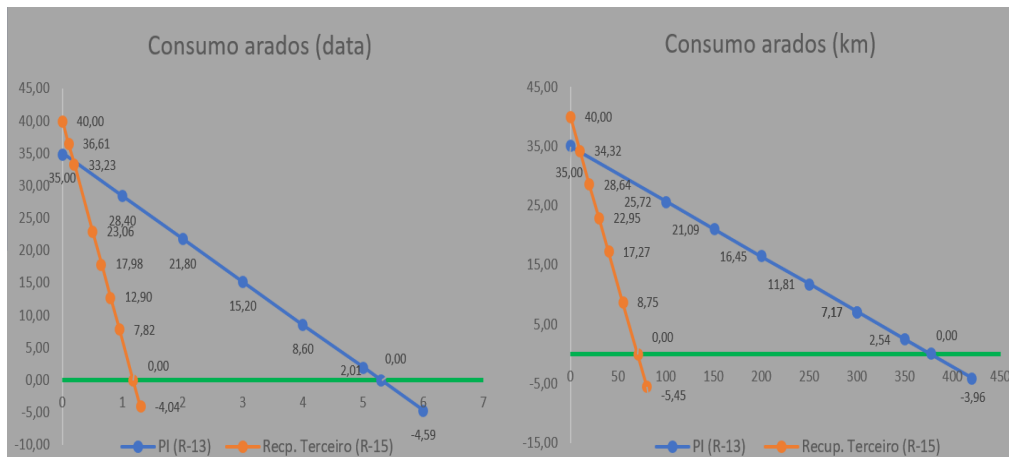


Figura 8. Gráfico comparativo do consumo das chapas de desgastes dos arados.

Função	Variáveis	Valor	Und. / fórmulas
$f(x)1$	$c(0,81)$	29,67	0,81 ano
$g(x)2$	$c(57,5)$	29,67	km
	a	?	consumo
	b	35	chapa de desg.
	c(a) data	-6,60	$f(0,81) = 0,81a + 35$
	c(a) km	-0,09	$g(57,5) = 57,5a + 35$

Tabela 1. Fórmulas para cálculo da taxa de desgastes

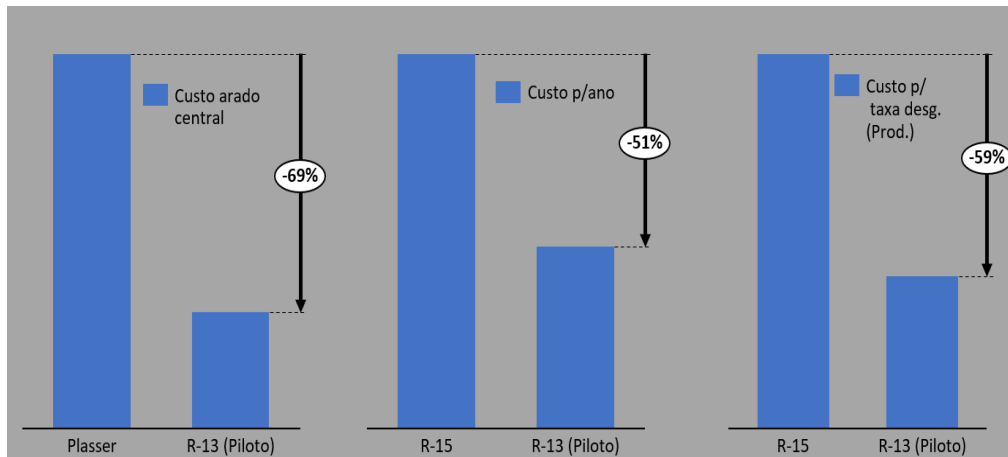


Figura 9. Gráfico comparativo dos custos

3.7 Processo de Fabricação e Montagem

O processo de fabricação do novo conjunto compreende:

- Corte das chapas em Hardox 450 por plasma CNC.
- Usinagem dos furos para fixação.
- Tratamento superficial (limpeza e proteção anticorrosiva).
- Montagem via parafusos DIN 7991 com torque controlado.

A substituição em campo pode ser realizada sem necessidade de soldagem, reduzindo significativamente o tempo de manutenção e riscos operacionais.

O controle de torque e inspeção periódica dos elementos de fixação são recomendados para garantir a integridade do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A implementação resultou em um aumento da vida útil do conjunto do arado central em até 5 vezes em relação ao design original.

- Redução de Custos: Menor consumo de material e redução do tempo de mão de obra devido à troca rápida por fixação mecânica.
- Disponibilidade: A redução do tempo de inatividade para manutenção corretiva aumentou a disponibilidade operacional da frota para o cronograma de manutenção da via.

A validação experimental da solução foi realizada em campo, por meio da aplicação piloto na reguladora R-13, com monitoramento do desgaste ao longo da operação.

Foram registrados os seguintes indicadores:

- Redução do volume de desgaste em aproximadamente 76,5%.
- Aumento da vida útil em até 5 vezes.
- Redução significativa no número de intervenções corretivas.

Adicionalmente, recomenda-se a implementação futura de instrumentação com sensores de carga e monitoramento de desgaste em tempo real, a fim de correlacionar de forma mais precisa os resultados experimentais com os modelos numéricos.



Figura 10. Peças em confecções do arado e chapas de desgastes novas para testes. Esse novo arado aplicado na reguladora R-13.



Figura 11. Arado finalizado pronto para ser aplicado.

5. CONCLUSÃO

O projeto demonstra como a Engenharia pode aplicar materiais avançados e otimização na geometria para gerar resultados expressivos. O aumento da durabilidade garante a longevidade dos ativos e a eficiência da manutenção ferroviária.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço à MRS Logística pela oportunidade de desenvolver este projeto e a todos os colaboradores envolvidos na sua execução.



7. REFERÊNCIAS

KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção: Função Estratégica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

LIKER, J. K. *O Modelo Toyota: 14 Princípios de Gestão do Maior Fabricante do Mundo*. Porto Alegre: Bookman, 2005.

CETNAROWSKI, E.; GRAMS, C. A. Retrofit em máquinas industriais: estudo de caso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br>>.

PLASSER & THEURER. *Export von Bahnbaumaschinen*. Linz, 1982.

HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. London: Edward Arnold, 1992.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook – Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology*. Materials Park: ASM International, 1992.

SSAB. *Hardox Wear Plate Handbook*. SSAB Swedish Steel, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G65 – *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. West Conshohocken, PA, USA.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E10 – *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E8 – *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E23 – *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.



OPTIMIZATION OF PLOWS AND INCREASED DURABILITY IN BALLAST REGULATORS

ABSTRACT

This technical article details the *re-design* project of the center plow wear plates of Plasser & Thurer ballast regulators, models SSP-103 and SSP-203. The primary objective was to address low durability and high maintenance costs associated with premature wear. The solution involved structural modification using SAE 1045 steel and replacing original welded wear plates with thicker Hardox 450 plates, fixed by mechanical elements. Tests showed a service life increase of up to five times, significantly improving operational availability and reducing maintenance costs

Keywords: *Ballast Regulator; Wear Plate; Hardox 450; Railway Maintenance; Durability; re-design; Optimization.*