

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Bruno Speziali Caldeira de Sousa

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CORRUGAÇÃO NO TRILHO:

determinação preditiva do momento adequado para a eliminação desse defeito

Belo Horizonte

2016

Bruno Speziali Caldeira de Sousa

**ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CORRUGAÇÃO NO TRILHO:
determinação preditiva do momento adequado para a eliminação desse defeito**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. János Landre Júnior

Belo Horizonte

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S725e	Sousa, Bruno Speziali Caldeira de Estudo da evolução da corrugação no trilho: determinação preditiva do momento adequado para a eliminação desse defeito / Bruno Speziali Caldeira de Sousa. Belo Horizonte, 2016. 147 f. : il. Orientador: Jânes Landre Júnior Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 1. Companhia Brasileira de Trens Urbanos - Belo Horizonte (MG). 2. Ferrovias - Trilhos. 3. Ferrovias - Manutenção e reparos. 4. Desgaste mecânico. 5. Vibração - Medição. 6. Retificação e polimento. I. Landre Júnior, Jânes. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título. SIB PUC MINAS CDU: 625.2(81)
-------	--

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Marques de Souza e Silva - CRB 6/2086

Bruno Speziali Caldeira de Sousa

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CORRUGAÇÃO NO TRILHO:

Determinação preditiva do momento adequado para a eliminação desse defeito

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Jânes Landre Júnior – PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Claysson Vimieiro – PUC Minas (Examinador Interno)

Prof. Dr. Pedro Américo Júnior – PUC Minas (Examinador Interno)

Prof. Dr. Yukio Shigaki– CEFET Minas (Examinador Externo)

Belo Horizonte, 03 de Junho de 2016.

In memoriam de Marilda Speziali,
obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, fica expressa aqui a minha gratidão, especialmente:

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de estudos que possibilitou cursar o programa de Pós Graduação da PUC MINAS.

Ao Professor Dr. Jánes Landre Júnior, pela orientação, pelo aprendizado e apoio em todos os momentos necessários.

Ao Sérgio da Silva e ao Francisco José Lopes, pelo apoio e acesso ao Metrô de Belo Horizonte.

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma metodologia para determinar de forma preditiva o momento adequado para correção do desgaste irregular dos trilhos conhecido por corrugação, através do uso da régua Rectiway, que é um instrumento de metrologia, e do tratamento de dados coletados por acelerômetros piezoelétricos fixados no trem ao trafegar em curvas com raios inferiores a 600 metros. Desenvolveu-se um equipamento de medição de vibração dedicado em decorrência da corrugação instalada nos trilhos, baseado nos parâmetros coletados tais como a amplitude e o comprimento de onda desse desgaste. Após a análise dos dados coletados, realizou-se o esmerilhamento dos trilhos nos trechos estudados, sendo feitas novas aquisições de dados com o analisador de vibrações e compararam-se os novos resultados com os anteriormente obtidos. Tendo em vista os aspectos abordados nesse estudo, conclui-se que a corrugação é uma consequência física direta do contato roda/trilho e que o esmerilhamento retifica o plano de rolamento e reperfila o perfil transversal do trilho, ao remover o desgaste ondulatório numa fase em que se evita consequências danosas que este possa provocar. As consequências do não controle da corrugação surgem seguindo uma progressão logarítmica e levarão, no seu estado final, a danos irreversíveis na infraestrutura e também no material rodante, obrigando a dispendiosos investimentos de reparação e substituição.

Palavras-Chave: Metodologia. Corrugação. Vibração. Esmerilhamento.

ABSTRACT

This paper presents a methodology to determine predictive way the right time to correct the uneven wear of the rails known for corrugation, through the use of Rectiway rule, which is a metrology tool, and data processing collected by accelerometers Piezoelectric set in train when driving in curves with radii less than 600 meters. Developed a vibration measuring equipment dedicated due to the corrugation installed on track, based on the listed parameters such as the amplitude and wavelength of such wear. After analyzing the data collected, there was the grinding of rails in the sites studied, and made new data acquisition with the analyzer vibration and compared the new results with those previously obtained. In view of the aspects addressed in this study, it was concluded that the corrugation is a direct physical consequence of the wheel contact / rail and the grinding rectifies the running surface and restores cross rail profile, removing the wave wear a stage that avoids harmful consequences that this may cause. The consequences of not controlling the corrugation arise following a logarithmic progression and lead in its final state, irreversible damage to the infrastructure and also in rolling stock, requiring costly investments repair and replacement.

Keywords: Methodology. Corrugation. Vibration. Grinding.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Seção transversal de uma ferrovia	33
FIGURA 2 – Perfil do trilho.....	35
FIGURA 3 - Bitola	38
FIGURA 4 – Funcionamento do Aparelho de mudança de via.....	39
FIGURA 5 – Direções do movimento.....	40
FIGURA 6 – Modelo da Suspensão para truque	46
FIGURA 7 – Modelo da Dinâmica do rodeiro	47
FIGURA 8 – Rodeiro e seus referenciais	48
FIGURA 9 – Sistema de medição em 4 pontos.....	52
FIGURA 10 – Contato roda/trilho.....	57
FIGURA 11 – Raios nos pontos de contato	58
FIGURA 12 – Evolução da corrugação em trilho em função do contato com a roda.....	60
FIGURA 13 – Tipos de corrugação.....	63
FIGURA 14 – Parâmetros de irregularidades de via	65
FIGURA 15 – Coleta e análise de dados	77
FIGURA 16 – Diagrama esquemático para análise de dados	77
FIGURA 17 – Sensor de Aceleração.....	78
FIGURA 18 – Parâmetros da via.....	83

LISTA DE FOTOS

FOTO 1 – Aparelho de mudança de via.....	39
FOTO 2 – Suspensão primária.....	44
FOTO 3 – Suspensão secundária.....	45
FOTO 4 – Truque quebrado	49
FOTO 5 – Teste de excitação no trilho.....	50
FOTO 6 – Acelerômetro no trilho	50
FOTO 7 – Sistema de fixação.....	51
FOTO 8 – Sistema do laser	52
FOTO 9 – Localização do equipamento no truque.....	53
FOTO 10 – Equipamento em detalhe	54
FOTO 11 – Corrugação na via de Belo Horizonte	61
FOTO 12 – Fissuração no canto da bitola	68
FOTO 13 – Floculação	68
FOTO 14 – Escamação do boleto.....	69
FOTO 15 – Estilhamento no canto da bitola	69
FOTO 16 – Despedaçamento no canto da bitola	70
FOTO 17 – Depressão	70
FOTO 18 – Patinação.....	71
FOTO 19 – Cavidade.....	71
FOTO 20 – Deformação plástica do boleto.....	72
FOTO 21 – Esmagamento do boleto	72
FOTO 22 – Trinca transversal	73
FOTO 23 – Desgaste lateral	74
FOTO 24 – Régua de medição de corrugação Rectiway.....	82
FOTO 25 – Tela do equipamento Rectiway	82
FOTO 26 – Trecho da via entre a estação Vila Oeste e Cidade Industrial.	83
FOTO 27 – Montagem do acelerômetro.....	84
FOTO 28 – Localização geral da instalação do equipamento no truque... ..	85

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Trecho da via de menor raio	91
GRÁFICO 2 – Trecho da via de maior raio	91
GRÁFICO 3 – Trecho que possui o Aparelho de Mudança de Via	92
GRÁFICO 4 – Linha de Tendência Linear	93
GRÁFICO 5 – Linha de Tendência Logarítmica	93
GRÁFICO 6 – Linha de Tendência Polinomial de Ordem 4	94
GRÁFICO 7 – Linha de Tendência Polinomial de Ordem 5	94
GRÁFICO 8 – Linha de Tendência Polinomial de Ordem 6	94
GRÁFICO 9 – Trecho da via de raio igual a 154 metros	95
GRÁFICO 10 – Trecho da via de raio igual a 244 metros	96
GRÁFICO 11 – Trecho da via de raio igual a 312 metros	96
GRÁFICO 12 – Trecho da via de raio igual a 461 metros	97
GRÁFICO 13 – Trecho da via de raio igual a 600 metros	98
GRÁFICO 14 – Trecho da via de raio igual a 998 metros	98
GRÁFICO 15 – Trecho da via de raio igual a 1200 metros	99
GRÁFICO 16 – Trecho da via de raio igual a 1800 metros	100
GRÁFICO 17 – Trecho da via de raio igual a 2498 metros	100
GRÁFICO 18 – Entre as estações Minas Shopping e José Cândido.....	101
GRÁFICO 19 – Entre as estações José Cândido e Santa Inês	102
GRÁFICO 20 – Entre as estações Santa Inês e Horto Florestal.....	103
GRÁFICO 21 – Entre as estações Horto Florestal e Santa Tereza	103
GRÁFICO 22 – Entre as estações Santa Tereza e Santa Efigênia	104
GRÁFICO 23 – Entre as estações Santa Efigênia e Central	105
GRÁFICO 24 – Entre as estações Central e Lagoinha.....	105
GRÁFICO 25 – Entre as estações Lagoinha e Carlos Prates	106
GRÁFICO 26 – Entre as estações Carlos Prates e Calafate	107
GRÁFICO 27 – Entre as estações Calafate e Gameleira.....	107
GRÁFICO 28 – Entre as estações Gameleira e Vila Oeste	108
GRÁFICO 29 – Entre as estações Vila Oeste e Cidade Industrial.....	109
GRÁFICO 30 – Entre as estações Cidade Industrial e Eldorado	109
GRÁFICO 31 – Entre as estações Minas Shopping e Eldorado	110
GRÁFICO 32 – Comparação dos resultados	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Valores das acelerações obtidos com o aparelho.....	90
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos

CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos

EUA – Estados Unidos da América

FFT – Fast Fourier Transform

HB – Hard Brinell

HV – Hard Vickers

Hz - Hertz

IBGE – Instituto Brasileiro de Geo-Estatísticas

MPa – Mega Pascal

NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 HISTÓRICO	26
1.2 PROBLEMA ANALISADO	30
1.3 HIPÓTESES	31
1.4 OBJETIVO GERAL	31
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
1.6 JUSTIFICATIVA	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 VIA PERMANENTE	33
2.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA VIA PERMANENTE	40
2.3 TRAÇADO DA VIA.....	40
2.4 TRILHOS	40
2.5 SUBLASTRO	40
2.6 LASTRO	40
2.7 DORMENTES	40
2.8 BITOLA	40
2.9 APARELHO DE MUDANÇA DE VIA.....	40
2.10 GEOMETRIA DA VIA PERMANENTE	40
2.11 DINÂMICA.....	40
2.12 ESTADO DA ARTE	49
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	57
3.1 CONTATO RODA/TRILHO.....	57
3.2 CORRUGAÇÃO	60
3.3 DESGASTES EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA	64
3.4 OUTROS DEFEITOS E DESGASTES NOS TRILHOS	66
3.5 VIBRAÇÕES.....	76
4 METODOLOGIA.....	81
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	91
6 CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS.....	113

APÊNDICE A – Recursos.....	117
APÊNDICE B – Dados coletados na via	119
APÊNDICE C– Dados coletados de vibrações	127
APÊNDICE D– Programa do display do equipamento.....	129
APÊNDICE E– Programa da memória de configuração	131
APÊNDICE F– Programa da memória principal.....	133
APÊNDICE G– Programa principal.....	135
APÊNDICE H – Esquema da placa do circuito	147

1 INTRODUÇÃO

O sistema ferroviário é um dos meios mais seguros, eficientes e econômicos para se realizar o deslocamento de grandes volumes de cargas e um maior número de pessoas.

O transporte sobre trilhos é um modal que apresenta características importantes para se alcançar um maior desenvolvimento das cidades, pois: utilizam vias exclusivas, o que evita a perda de tempo com congestionamentos; possuem um sistema de monitoramento que permite otimizar o uso dessas vias; emite um baixo nível de poluição ambiental (em torno de 65 dB) e comporta um grande número de pessoas se comparado ao modal rodoviário (CBTU,2013).

O aumento da quantidade de veículos ferroviários que trafegam sobre a via, da frequência do tráfego e do valor da carga por eixo, submete a via permanente a maiores solicitações de esforços, o que contribui para acelerar a degradação dos seus componentes, especialmente, dos trilhos. Essa degradação afeta diretamente a integridade desses elementos, já que aumentam os riscos de falhas, que podem ocasionar acidentes e trazer, como consequência, perdas humanas, além de perdas econômicas e prejuízos ambientais.

Entre os estudos sobre defeitos em trilhos, uma atenção particular tem sido dada a um defeito chamado desgaste ondulatório ou corrugação. Assim, este trabalho visa estudar a influência da corrugação da via permanente sobre o TUE (Trem Unidade Elétrico) no metrô de Belo Horizonte.

Com o aumento da incidência desses defeitos e com o rápido desgaste da via, aumentaram-se os cuidados com a manutenção requerida pelo sistema. Esses defeitos geram um desafio para as operações nas ferrovias, já que com o tráfego de um número maior de trens, menos tempo resta para a realização das inspeções e reparos de defeitos. Assim, o desgaste dos trilhos, quando atinge determinado limite, passa a exigir a substituição dos mesmos. Devido ao alto custo do material e da manutenção envolvidos na operação, a engenharia ferroviária busca alternativas para atenuar estes problemas sem afetar o desenvolvimento do sistema e muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas em diversos países com esse objetivo (MARTINS, 2010).

1.1 Histórico

Antes da criação das máquinas a vapor, já existiam carroças tracionadas por animais que se movimentavam sobre trilhos, possibilitando um transporte de carga de forma mais eficiente. Na Europa do século XVI, alguns países utilizavam vias sobre trilhos de madeira destinados, principalmente, ao deslocamento de carvão e minérios extraídos de minas subterrâneas (SETTI, 2000).

Em meados do século XVIII, os mineiros começaram a revestir os trilhos de madeira com tiras de ferro para torná-los mais resistentes e duráveis. No entanto, na Inglaterra, nessa mesma época, os ferreiros deram início a fabricação de trilhos, inteiramente, de ferro. Os trilhos eram munidos de bordas para conduzirem os vagões com rodas comuns de carroções (LAUERMAN, 2007).

No final do século XVIII, as máquinas a vapor estavam no seu auge, paralelamente ao processo da Revolução Industrial. No início do século XIX, o inventor inglês Richard Trevithick, construiu a primeira máquina capaz de aproveitar altas pressões de vapor para girar um eixo trator. Ele a montou sobre um chassi de quatro rodas, projetada para deslocar-se sobre trilhos. Em 1804, Trevithick fez uma experiência com este veículo, puxando um vagão carregado com nove toneladas de carvão, por uma via de trilhos com 15 km de extensão. Esta foi a primeira locomotiva bem sucedida que se tem registro. Em 1813, a locomotiva a vapor foi apresentada à população da Inglaterra construída pelo inglês William Hedley. A partir deste momento, inicia-se a busca pelo desenvolvimento das ferrovias e locomotivas (NETO, 2010).

Em 1825, George Stephenson construiu a primeira ferrovia pública do mundo, que interligava Stockton a Darlington, na Inglaterra, cobrindo uma distância de 32 km. Essa foi a primeira ferrovia de trens de carga a cumprir horários regulares. Stephenson conforme Neto (2010) foi o primeiro a identificar a necessidade de que as ferrovias de um país deveriam possuir uma distância entre os trilhos padronizada, ou seja, uma mesma bitola em toda sua malha ferroviária. A bitola nas ferrovias por ele construídas, cujo valor era de 1,435 m, correspondia ao comprimento dos eixos das diligências tracionadas por animais não havendo outra justificativa técnica para sua adoção (NETO, 2010). Em 1907, na Conferência Internacional de Berna, na Suíça, essa bitola foi consagrada como “Bitola Internacional”, sendo hoje adotada na maioria das ferrovias europeias, estadunidenses e canadenses.

A construção das ferrovias difundiu-se rapidamente por todo o continente europeu. Em meados de 1870, a base atual da rede ferroviária da Europa já havia sido construída, com

algumas linhas inauguradas no final do século XIX e início do século XX. Ainda no século XIX, os países do velho continente começam a construir ferrovias em suas colônias. Um exemplo importante deste fato aconteceu na Índia, colônia do Reino Unido, que passou a contar com mais de 40.000 km de linhas férreas. Nesse mesmo período, a Rússia inicia a construção da mais extensa linha ferroviária do planeta, a Transiberiana, com mais de 9200 km de comprimento, concluída em 1916 (SETTI, 2000).

Com extensões cada vez maiores de linhas ferroviárias, a busca por locomotivas de maior potência tornou-se o foco de muitos engenheiros e pesquisadores. No final do século XIX, muitos trens já desenvolviam velocidades que variavam de 80 a 100 km/h. Nesse período, as primeiras locomotivas elétricas foram projetadas. Em 1895, a empresa Baltimore & Ohio Railroad colocou em operação um trem elétrico através de um túnel de 5600 metros por baixo da cidade de Baltimore, nos EUA, sendo a primeira empresa do setor ferroviário a utilizar locomotiva elétrica. A partir do século XX, muitas ferrovias europeias eletrificaram suas linhas principais (NETO, 2010).

Na segunda metade do século XIX, foi introduzido o uso do aço na fabricação de trilhos e vagões. Os trilhos de aço, se descobriu, tinham durabilidade vinte vezes superior à dos trilhos de ferro e assim, foram aos poucos, substituindo estes últimos. Os primeiros vagões de carga ou de passageiros tinham estruturas frágeis, sendo constituídos basicamente, de madeira. Os vagões de passageiros, fabricados, inteiramente de aço, entraram em serviço regular em 1907 e logo substituíram a maioria dos carros de madeira. Os primeiros vagões de carga, totalmente de aço entraram em circulação em 1896. No final da década de 1920, eles já haviam substituído, quase que totalmente, os vagões de madeira (LAUERMAN, 2007).

As primeiras ferrovias apresentavam altos índices de acidentes e falta de segurança. Em meados do século XIX, porém, importantes inovações melhoraram o grau de segurança das estradas de ferro. Em 1869, o inventor estadunidense George Westinghouse, patenteou o mecanismo de freio a ar. Com estes freios, os trens poderiam reduzir a velocidade ou parar mais rapidamente, do que quando utilizava o sistema de freios manuais. Em 1873, outro inventor estadunidense, Ely Janney, patenteou um dispositivo de engate de vagões automático. Antes da invenção de Janney, a operação de engate era realizada manualmente, sendo comum encarregados dessa operação perderem dedos e mãos, enquanto engatavam vagões (SETTI, 2000).

A Ferrovia no Brasil

No Brasil, as primeiras iniciativas nacionais relativas à construção de ferrovias remota ao ano de 1828, quando o governo Imperial autorizou por Carta de Lei, a construção e exploração de estradas em geral, tendo como propósito, a interligação das diversas regiões do país. A primeira tentativa de implantação de uma ferrovia deu-se em 1835, quando o Regente Antônio Feijó, promulgou uma Lei, concedendo favores a quem quisesse construir e explorar uma estrada de ferro ligando o Rio de Janeiro, capital do Império, às capitais das Províncias de Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Bahia. Não apareceu, na ocasião, interessado em tão arriscada empreitada. Em 1852, Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, quase que apenas por sua conta e risco, construiu a ligação entre o Porto de Mauá (interior da Baía da Guanabara) e a Raiz da Serra (Petrópolis). Assim, em 1854, foi inaugurada a primeira Estrada de Ferro do Brasil, com 14,5 km de extensão, em bitola de 1,63 metros (NETO, 2010).

A Companhia Estrada de Ferro D. Pedro II foi inaugurada em 1858, com trecho inicial de 47,21 km de extensão, ligando a Estação da Corte a Queimados, no Rio de Janeiro. Esta ferrovia se constituiu em uma das mais importantes obras da engenharia ferroviária do país, na ultrapassagem dos 412 metros de altura da Serra do Mar, com a realização de cortes, aterros e perfurações de túneis, entre os quais o Túnel Grande com 2.236 metros de extensão, na época o maior do Brasil, inaugurado em 1864. Em 1889, essa estrada deu origem à Estrada de Ferro Central do Brasil (BARAT, 1978).

Um dos mais importantes fatos na história do desenvolvimento ferroviário no Brasil foi a ligação Rio – São Paulo, unindo as duas mais importantes cidades do país, em 1877, quando os trilhos da Estrada de Ferro São Paulo (inaugurada em 1867), uniram-se com os da E. F. D. Pedro II (BARAT, 1978).

Até o final do século XIX, outras concessões foram outorgadas, agora na bitola métrica. Essa variação de bitola foi uma solução encontrada para economizar na construção de ferrovias, pois nessa bitola os dormentes têm sua dimensão reduzida quando comparada às outras, gerando uma redução de material e com o custo de mão de obra, pois a abertura de estrada é mais estreita. Essa é a origem de um dos graves problemas da malha ferroviária nacional (BARAT, 1978).

Em 1922, ao se celebrar o 1º Centenário da Independência do Brasil, existia no país um sistema ferroviário com, aproximadamente, 29.000 km de extensão, cerca de 2.000 locomotivas a vapor e 30.000 vagões em tráfego. Em 1930, foi introduzida a tração elétrica no

Brasil, para substituir, em determinados trechos, a tração a vapor. Em 1939, iniciou-se a substituição da tração a vapor pela diesel-elétrica, processo esse interrompido durante a Segunda Guerra Mundial e intensificado na década de 1950 (BARAT, 1978).

Após 1945, houve um decréscimo de investimentos em novas ferrovias no Brasil, em função da concorrência com a rodovia, setor que o governo investiu maciçamente os recursos financeiros (NETO, 2010).

A falta de planejamento quanto à construção das ferrovias no Brasil resultou nos seguintes problemas do sistema ferroviário: grande diversidade de bitolas que dificulta a integração operacional entre as diversas ferrovias; traçados de estradas de ferro, excessivamente sinuosos e extensos; estradas de ferro distribuídas pelo país de forma dispersa e isolada (NETO, 2010).

Até meados de 1960, a rede ferroviária brasileira chegou a atingir a marca de 37.200 km, de linhas, tendo então ficado estacionada nisso, durante muitos anos. Posteriormente, após a desativação de vários trechos considerados antieconômicos, chegou a ficar reduzida a 30.550 km, em 1979 (NETO, 2010).

Entretanto, essa realidade começou a mudar quando o governo brasileiro transferiu à iniciativa privada, em 1990, através de contrato de concessão, a exploração e uso das ferrovias, por meio do Programa Nacional de Desestatização (PND). Como requisito para obter o direito de concessão, as empresas deveriam apresentar um plano de investimentos no setor. A partir de então, o transporte de cargas e passageiros tomou um novo fôlego e novas perspectivas surgiram em relação ao futuro das ferrovias no Brasil (CASTRO, 2010).

Uma demanda importante para a melhoria do sistema ferroviário é o transporte de passageiros nos grandes centros urbanos. De acordo com o censo de 2000, do IBGE, mais de 80% da população brasileira reside nas cidades. Torna-se então, essencial a organização de um sistema de transporte urbano eficiente, que atenda aos usuários nos requisitos de segurança, conforto e rapidez (ANTP, 2011).

Contudo, a política brasileira, até então, é de investir no modal rodoviário, acarretando em um fluxo lento de pessoas e em um agravamento ambiental em função da grande emissão de gases poluentes lançados na atmosfera (ANTP, 2011).

O modal ferroviário tem boas perspectivas de se firmar como o mais importante meio de transporte no país, pois é competitivo quando se trata da redução de custos, agilidade e capacidade no transporte de cargas e pessoas. Porém, há ainda a necessidade de grandes investimentos para que o Brasil possa expandir cada vez mais a sua capacidade ferroviária (ANTP, 2011).

Metropolitano ou Metrô

A primeira linha de metropolitano foi inaugurada em 1863 em Londres. Tinha como principal função transportar o maior número de pessoas, para que, dessa forma, amenizasse com os problemas de trânsito da cidade. Os comboios ou trens a vapor circulavam dentro de túneis que percorriam o subsolo da capital inglesa. Apesar da grande novidade gerada pela apresentação deste novo meio de transporte urbano, os passageiros deixaram rapidamente de utilizá-lo pelo mal-estar criado pelo fumaça vinda da locomotiva. Porém, em 1890, as linhas passaram a ser eletrificadas, o que relançou o potencial do metropolitano. Em um curto período de tempo, muitas outras cidades construíram as suas redes, desenvolvendo ao mesmo tempo técnicas de construção de túneis e conforto dos veículos (PEDRETTI, 2010).

Os sistemas de metropolitano situam-se, normalmente, em grandes áreas metropolitanas e transportam elevado número de pessoas. A extensão das redes de metropolitano varia muito de cidade para cidade e também das infraestruturas associadas a elas. Em cidades de maiores dimensões a rede pode até ultrapassar os limites da cidade, estendendo-se a municípios ou regiões vizinhas.

No Brasil, a primeira linha de metropolitano foi inaugurada apenas em 1974, na cidade de São Paulo. Cinco anos mais tarde, em 1979, foi construído o sistema na cidade do Rio de Janeiro, que hoje em dia é o segundo maior deste gênero no país; o primeiro é o de São Paulo. Em 1985, foram inaugurados o Metropolitano do Recife e o de Porto Alegre, e no ano seguinte, o de Belo Horizonte (CBTU, 2013).

1.2 Problema Analisado

O desgaste conhecido por corrugação é uma consequência física do contato roda/trilho, sendo um fenômeno recorrente no meio ferroviário. É caracterizado pelo aparecimento de deformações ondulatórias de periodicidade variável, na superfície superior dos trilhos. Os desgastes do boleto são uma consequência natural do seu uso em serviço, devendo ser permanentemente monitorados e saneados, em função dos resultados danosos que eles causam ao material rodante e à via, onerando o custo da manutenção (GRASSIE, 2007).

1.3 Hipóteses

A remoção deste desgaste é uma ação da manutenção baseada em critérios de segurança, de conforto, econômicos e ambientais. Remover a corrugação significa restaurar a qualidade do plano de rolamento do trilho, repondo sua geometria original, prolongando sua vida útil (MARTINS, 2010).

A operação de esmerilhamento, ao retificar a superfície de rolamento do trilho, remove os defeitos metalúrgicos, desgastes, deformação por esmagamentos, fissuras e zonas de pressão pontuais, evitando a sua progressão e constituindo um meio de aumentar a vida útil de um trilho, das infraestruturas e do material rodante (MARTINS, 2010).

A atitude preventiva pressupõe criar todo um programa de manutenção, que através da retificação do plano de rolamento e reperfilamento do perfil transversal do trilho, remova e mantenha o desgaste ondulatório numa fase em que se evitam as consequências que este possa provocar.

1.4 Objetivo Geral

Participar do desenvolvimento de um instrumento para medir os níveis de vibrações ocasionados pela corrugação instalada nos trilhos da via permanente da Companhia Brasileira de Trens Urbanos de Belo Horizonte e determinar de forma preditiva o momento adequado para correção deste tipo de desgaste irregular, através de metodologia de instrumentação e tratamento de dados coletados em curvas com raios inferiores a 600 metros.

1.5 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica a respeito dos principais elementos da via permanente, do movimento do trem, do contato roda/trilho, corrugação dos trilhos e sobre manutenção preditiva;

- Coletar valores de amplitudes e dos comprimentos de onda em campo para determinar os parâmetros ondulatórios da corrugação;

- Estabelecer os limites de medição para a construção do equipamento dedicado;

- Participar do desenvolvimento do equipamento de medição de vibração dedicado para medir o nível da corrugação instalada nos trilhos;
- Coletar os valores das acelerações, que são as respostas dos níveis da corrugação nos trilhos, através do equipamento dedicado;
- Analisar os dados coletados para determinar de forma preditiva o momento adequado para realizar as intervenções de manutenção para eliminação da corrugação.

1.6 Justificativa

Em virtude das consequências da corrugação para o material rodante e para a via permanente, o estudo do desgaste ondulatório sobre os trilhos torna-se essencial para que o sistema ferroviário opere em níveis aceitáveis de segurança, conforto e economia.

No material rodante, pode-se citar: aumento dos níveis de vibrações; a fadiga prematura do sistema de suspensão primária; o surgimento de trincas nas caixas de engrenagens do truque; o aparecimento de trincas nos tubos suspensórios do truque e a aceleração da propagação de trincas em chapas de desgaste da caixa de rolamentos, em abraçadeiras do reservatório de ar comprimido e nas portas dos veículos; alteração do comportamento dinâmico do material circulante, podendo em certos casos, alterar as condições de conforto, velocidade e a segurança do sistema; rolamento irregular do veículo, reduzindo a qualidade do serviço e provocando aumento de ruído (CBTU, 2013).

Na via permanente, tem-se: o desgaste do boleto do trilho, o que diminui sua vida útil; a quebra de dormentes e desgastes irregulares devido ao atrito com o lastro; quebra e desintegração do lastro; laqueamento da via, ou seja, o rebaixamento do nivelamento em função da quebra do lastro; ruptura de fixações dos trilhos; quebra da palmilha amortecedora e isolante de apoio do trilho (CBTU, 2013).

No âmbito geral, como consequências da corrugação, precisa ser levado em consideração ainda o aumento substancial dos custos da operacionalidade e influência negativa nos edifícios circundantes, gerando elevado número de reclamações dos moradores dos arredores (MARTINS, 2010).

Em resumo, o desgaste ondulatório amplia a manutenção requerida na via e nos veículos, aumenta a resistência à tração, submete os trilhos a vibrações, reduzindo o conforto nas viagens, além de provocar uma maior poluição sonora (MARTINS, 2010).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Via Permanente

Em um projeto de implantação de uma via férrea, existe uma grande variedade de critérios que devem ser considerados para o sucesso do empreendimento. Com relação a esses critérios, segundo Porto (2004), devem prevalecer os aspectos técnicos, econômicos e ambientais em detrimento dos políticos.

O estudo da geometria da via permanente, de acordo com Neto (2010), aborda o traçado em planta e o perfil longitudinal, cujas características geométricas podem ser fortemente condicionadas por diferentes tipos de tráfego que serão utilizados e pela classe dos veículos.

Conforme Porto (2004), as ferrovias podem ser divididas em infraestrutura e superestrutura. As obras que formam a plataforma da estrada, como pontes, viadutos, aterros, túneis e drenagem, por exemplo, fazem parte da infraestrutura. Já a via permanente, que apresenta três elementos principais, contempla a superestrutura. Esses três elementos principais, segundo o mesmo autor, são o lastro que pode ser dividido em duas camadas com características distintas, que são o lastro propriamente dito e o sublastro, os dormentes e os trilhos.

A Figura 1 mostra uma seção transversal típica de uma ferrovia tradicional, com sistema duplo de trilhos paralelos, contendo seus elementos principais.

Figura 1- Seção transversal de uma ferrovia



Fonte: Porto, 2004.

2.2 Características Geométricas da Via Permanente

Como especificidades, a via permanente além de oferecer suporte aos veículos, tem como função adicional oferecer guiamento ao sistema, o que implica em uma manutenção periódica no nivelamento, alinhamento e espaçamento dos trilhos. O contato roda/trilho faz-se através de duas superfícies lisas, produzindo um valor reduzido de resistência ao movimento. Isso permite o reboque de elevados valores de carga com uma potência moderada. Porém, esse reduzido valor do coeficiente de aderência provoca esforços máximos de tração e frenagem, obrigando a elevadas distâncias de frenagem e valores máximos normativos das rampas inferiores aos permitidos em estradas, normalmente inferiores a 2% (NETO, 2010).

2.3 Traçado da Via

Para Neto (2010), o traçado de uma via ferroviária deve ser o mais harmonioso quanto possível, sem descontinuidades, de forma que os veículos não sofram esforços muito grandes que poderiam comprometer principalmente os elementos de engate, assim como a distância entre os trilhos não pode variar ou os veículos descarrilariam. Mesmo isso sendo aparentemente óbvio, sem a devida manutenção para assegurar a segurança do sistema, é muito difícil de manter as características geométricas iniciais e desejadas, pois os esforços da grande massa de um trem deslocam os trilhos, quebra os dormentes, e movimenta o lastro, por exemplo.

2.4 Trilhos

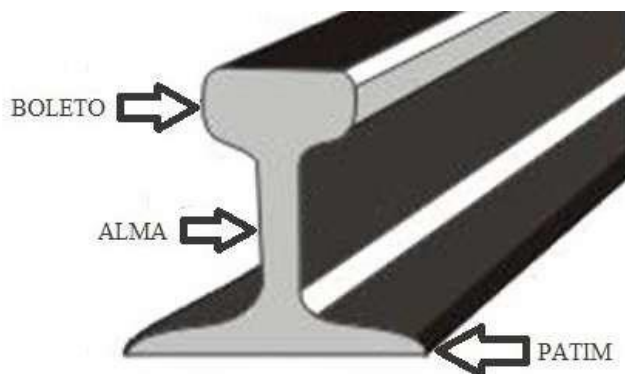
Os trilhos são vigas longas de aço com forma ou perfil especial que constituem a superfície de rolamento plana e de nível sobre as quais percorrem as rodas do material rodante (BRINA, 1996). São os elementos da via permanente que guiam o veículo no trajeto e dão sustentação ao mesmo, funcionando como uma viga contínua que transfere as solicitações das rodas para os dormentes (PORTO, 2004).

Analisando o desenvolvimento da tecnologia do aço, o trilho sofreu uma notável mudança ao longo da história do transporte ferroviário. Devido ao grande desgaste a que está submetido, em função do atrito com as rodas, o perfil do trilho evoluiu para uma seção em que a mesa superior passou a ter espessura, consideravelmente, maior que a da alma, para permitir seu uso contínuo, mesmo após vários anos de serviço (DUTRA, 2012).

O perfil atual é denominado Vignole, e para Dutra (2012), o trilho possui três partes constituintes: boleto, alma e patim.

Esses elementos estão representados na Figura 2.

Figura 2 – Perfil do trilho



Fonte: Dutra, 2012.

A NBR 7650 define o boleto como a parte do trilho destinada ao apoio e deslocamento da roda ferroviária. Essa norma define a alma como a parte estreita do trilho, entre o boleto e o patim. A resistência à flexão do trilho está relacionada com a altura e a espessura da alma, devendo essa possuir uma espessura mínima para assegurar uma adequada resistência e rigidez transversal. Tal espessura, ainda leva em consideração o desgaste provocado pela corrosão atmosférica. O patim, região inferior do trilho, deve possuir uma dimensão que mantenha a alma perpendicular ao dormente (placa de apoio, definida posteriormente) durante as solicitações transversais, como em curvas, por exemplo. Se a essa espessura do patim não for adequada, pode haver um acúmulo de deformações permanentes ao longo da vida útil desse componente, o que provocaria acidentes (ROLDO, 1998).

Para apresentar uma resistência adequada às diversas solicitações a que é submetido, o trilho deve possuir, segundo Roldo (1998): elevados limites de escoamento e de resistência à tração, aliados com boa plasticidade; elevado valor de dureza e resistência ao desgaste; alto valor de resistência à fadiga por contato; elevada resistência à propagação de fratura; baixa suscetibilidade à fragilização pelo hidrogênio; boa soldabilidade e permanência em serviço, sem ocorrência de defeitos que comprometam a segurança do tráfego na ferrovia.

A maioria dessas características é antagônica, tornando-se, dessa maneira, necessária uma adequação da escolha das composições e tratamentos dos trilhos, para que se atinja o equilíbrio entre as propriedades requeridas (ROLDO, 1998).

Os avanços obtidos na fabricação do aço e na produção dos trilhos, os procedimentos químicos e os tratamentos térmicos são os principais progressos metalúrgicos que mais influenciaram na melhora dos trilhos para exercerem suas funções (MARICH, 2002).

A desgaseificação a vácuo e o lingotamento contínuo, procedimentos aplicados na fabricação do aço e na produção dos trilhos, têm proporcionado a obtenção de lingotes praticamente isentos de defeitos, com composição e pureza mais adequadas ao uso desse material. Os progressos nos procedimentos químicos e nos tratamentos térmicos resultaram em consideráveis melhorias nas características de resistência, dureza e fadiga (MARICH, 2002).

No estágio atual de desenvolvimento da siderurgia do aço, sabe-se que os principais elementos que respondem pelo aumento da resistência são: carbono, manganês e cromo. Portanto, têm-se observado a fabricação cada vez maior de trilhos com percentual de carbono de 0,5% a 0,9% e teores consideráveis de manganês e cromo, sendo denominados trilhos perlíticos. Esses trilhos possuem maior resistência mecânica e maior resistência ao desgaste. Apresentam valores de dureza entre 260 e 290 HB e resistência à tração entre 900 a 1200 MPa (ROLDO 1998).

A perlita fina, com pequeno espaço interlamelar, assegura a resistência ao desgaste que o trilho necessita, constituindo um componente de maior vida útil e que permite a aplicação de altos valores de cargas e, conseqüentemente, grande intensidade de tráfego (LEAL, 2004).

Novos materiais não tem sido implementados em quantidades significativas na fabricação de trilhos. As principais razões para isso podem ser o conservadorismo da indústria ferroviária e o desempenho aceitável dos aços perlíticos, particularmente em combinação com procedimentos de gerenciamento apropriados (MARICH, 2002).

Do ponto de vista econômico, devido ao alto custo de substituição do trilho, é essencial saber o limite de uso de um trilho que sofreu desgaste, para não afetar a segurança da via permanente. Para Stopatto (1997), o trilho é reaproveitado na outra fila até que seu desgaste total atinja, aproximadamente, 25% da área do boleto. Em tráfego muito intenso, nem sempre é possível esse reaproveitamento, pois pode, segundo uma avaliação objetiva, ter sido alcançado o limite de bitola e o desgaste total desse componente da via permanente.

2.5 Sublastro

Com o intuito de evitar a penetração do lastro no solo e a contaminação deste por material decorrente do leito, utiliza-se o sublastro (PAIVA, 1999). Este elemento, optativo na construção de uma ferrovia, é o material granular de custo mais acessível que o utilizado no lastro, e que fica diretamente em contato com a superfície final da terraplenagem. Segundo Brina (1996), suas funções principais são: evitar a mistura do lastro com o material da plataforma; permitir certa elasticidade ao apoio do lastro; proteger o leito à ação das águas e aumentar a capacidade de suporte da via.

2.6 Lastro

Para Brina (1996), lastro é o material utilizado entre os dormentes e o sublastro ou a superfície de terraplenagem, podendo ser constituído por brita, areia, cascalho, escórias, e até mesmo solo, a pior escolha possível. Esse elemento tem a função, segundo Paiva (1999), de distribuir à camada inferior as cargas provenientes dos dormentes; dar suporte semi-elástico aos esforços, atenuando as trepidações resultantes da passagem dos veículos; dar regularidade à seção longitudinal da via, suprimindo eventuais irregularidades da terraplenagem; facilitar a drenagem da superestrutura e restringir o movimento dos dormentes frente aos esforços horizontais.

2.7 Dormentes

De acordo com Brina (1996), os dormentes são os elementos da superestrutura ferroviária que recebem os esforços dos trilhos, fixando-os, mantendo a bitola, e transmitindo as tensões ao lastro. Para que isso ocorra é preciso que o dormente atenda aos seguintes requisitos, para Coimbra (2006): o conjunto dormente e trilho tenha boa rigidez com alguma elasticidade; suas dimensões sejam suficientes para receber e distribuir corretamente os esforços; resistências às solicitações; durabilidade; boa fixação ao trilho; boa resistência à movimentação horizontal e vertical e que permita com facilidade o nivelamento da via (socaria).

Para tanto, a escolha do material a ser utilizado, conforme Coimbra (2006), depende de uma análise de viabilidade econômica, que considere entre outros fatores, o custo de fabricação, o preço de colocação, substituição, a manutenção e o valor residual.

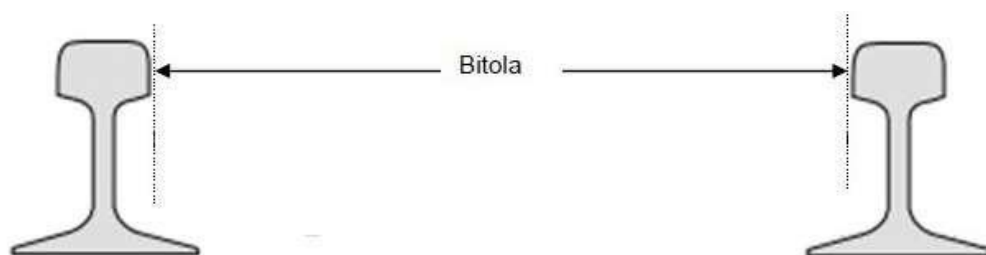
Sua disposição é sempre perpendicular à linha, tanto em tangentes quanto em curvas e seu espaçamento é calculado de forma que consigam resistir aos esforços oriundos dos trilhos.

2.8 Bitola

Segundo Schramm (1997), denomina-se bitola à distância entre as faces internas das duas filas de trilhos, medida a 16 mm, abaixo do plano de rodagem (plano constituído pela face superior dos trilhos). Uma via, entretanto, pode ter mais de um tipo de bitola, permitindo que seja utilizada por mais de um tipo de trem. A tolerância no tamanho da bitola varia em função do país, da organização ferroviária e da velocidade da via. A bitola padrão ou internacional é a de 1,435 m. A bitola métrica ou estreita, de 1,00 m, é utilizada em 78% das ferrovias brasileiras e a de bitola larga (1,60 m), tem participação em 20% do sistema ferroviário, com previsão de crescimento, pois foi padronizada pelo Plano Nacional de Viação.

A Figura 3 representa a bitola de uma via.

Figura 3 – Bitola



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.9 Aparelho de Mudança de Via

É um conjunto de peças colocadas nas concordâncias de duas linhas para permitir a passagem dos veículos ferroviários de uma linha para outra. Também denominado de "chave", compõe-se das seguintes partes principais, para Brina (1996): agulhas, contra-agulha ou "encosto da agulha", aparelho de manobra, trilhos de enlace ou de ligação, "jacaré" ou "coração", calços, coxins e contratrilhos.

De acordo com Sucena (2006), como no modal ferroviário a mudança de via não pode ser feita pelo próprio veículo, como é o caso do modal rodoviário, este é feito através do aparelho de mudança de via. Com o uso deste acessório os veículos ferroviários podem mudar

de linha, fazer retornos ou cruzar por outras linhas. É utilizado tanto nas vias de tráfego normal, quanto em oficinas e pátios.

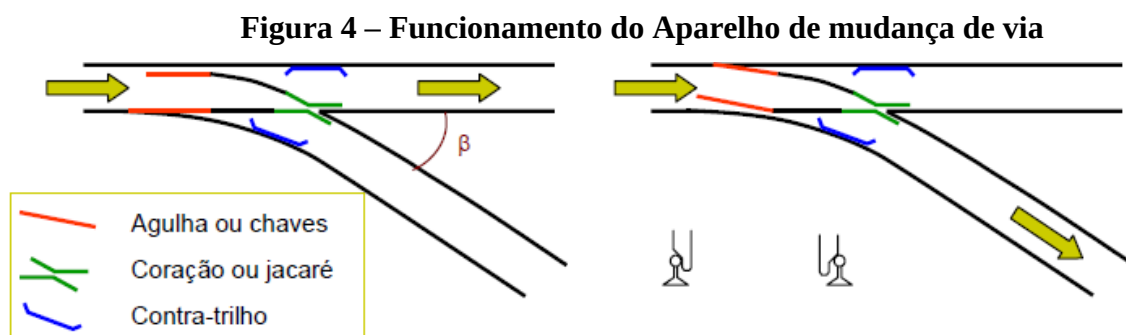
A Foto 1 exibe esse equipamento.

Foto 1– Aparelho de mudança de via



Fonte: Porto, 2004.

Proporciona flexibilidade ao traçado e por ser o único elemento móvel da via, é fundamental na segurança da operação (PORTO, 2004). A Figura 4 ilustra o funcionamento de um aparelho de mudança de via.



Fonte: Porto, 2004.

2.10 Geometria da Via Permanente

As ferrovias, devido as suas particularidades próprias, possuem exigências mais severas quanto às características geométricas, que as rodovias (NETO, 2010). A questão das cargas, da aderência nas rampas, à solidariedade rodas-eixo e o paralelismo dos eixos de mesmo truque impõem a necessidade de raios mínimos maiores que os das rodovias.

Para Neto (2010), o raio mínimo para uma via férrea é estabelecido por normas e deve permitir a inscrição da base rígida dos truques dos carros e locomotivas, além de limitar o escorregamento entre roda e trilho. Outro aspecto importante é a superelevação que consiste em elevar o nível do trilho externo de uma curva. Isso reduz o desconforto produzido pela mudança de direção, diminui o desgaste do contato do metal da roda com o metal do trilho e o risco de tombamento devido à força centrífuga que aparece nas curvas. A velocidade máxima de projeto de um determinado trecho é definida pela curva de menor raio.

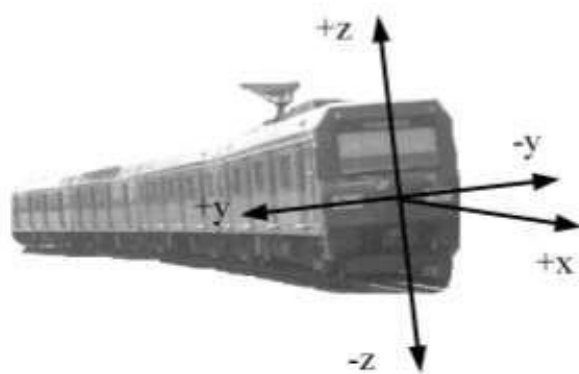
2.11 Dinâmica

A dinâmica do movimento de um trem pode ser analisada como um sistema de controle de posição. Sua trajetória entre as estações é especificada por variáveis cinemáticas como deslocamento, velocidade e aceleração que são governadas somente pelos requisitos operacionais da via (HILL, 1994).

O movimento é um processo espacial e temporal da locomoção dos corpos. Este processo é descrito através das variáveis fundamentais tempo e espaço, sendo o espaço uma grandeza vetorial reversível e o tempo, uma grandeza escalar não reversível (WENDE, 2003).

Em um espaço tridimensional, o movimento do trem possui três direções possíveis, como apresentado na Figura 5.

Figura 5- Direções do movimento



Fonte: Wende, 2003.

Pode-se, portanto, distinguir as seguintes direções do movimento:

- a) a direção longitudinal, no eixo x, sendo esta a principal direção do movimento;
- b) a direção transversal, no eixo y, desenvolvida durante uma curva e associada a um movimento secundário;

c) a direção vertical, no eixo z, desenvolvida durante uma rampa e também associada a um movimento secundário.

As formas do movimento podem ser classificadas como translação, rotação e oscilação. A translação é composta pelo movimento na direção longitudinal (movimento principal), pelo movimento lateral ocorrido durante as curvas ou mudanças de via e pelas elevações durante as rampas (movimentos secundários). Durante a rotação, as rodas e o veículo giram com a curva. A combinação entre o movimento de translação e o movimento de rotação dá origem ao movimento circular (WENDE, 2003).

Assim, o movimento de um trem ao longo da via pode ser reduzido a um movimento de translação em um plano. Na direção do movimento ao longo da via, todos os procedimentos da mecânica são aplicáveis (WENDE, 2003).

Quanto à via, conforme Wende (2003), além de ser caracterizada pelo seu comprimento, é caracterizada em cada ponto pela sua inclinação e possível curvatura. Dependendo das condições geográficas, estes parâmetros estão sempre mudando.

Considerando os sistemas de guiagem, o direcionamento de veículo pode ser dividido em dois grupos, para Wickens (1991): em veículos autônomos direcionados, que dependem da ação obrigatória do motorista e veículos autônomos guiados, que limitam-se a acompanhar uma trajetória previamente estabelecida.

O sistema ferroviário é composto de uma via com trilhos e geometria pré-definida que guia os eixos do veículo em movimento ao longo da trajetória (BARBOSA, 1999). Os eixos são compostos, geralmente, por rodas cônicas que desenvolvem forças de direcionamento no contato. A teoria utilizada para o cálculo de forças de contato (mecânica de contato) em rodas de borracha (pneu/pavimento) ou rodas metálicas (roda/trilho) é a mesma, sendo que a rigidez tangencial de contato difere por um fator da ordem de 100 vezes (BARBOSA, 1999).

O projetista de um veículo ferroviário depara-se com a necessidade de atender os seguintes requisitos básicos: desempenho, conforto e segurança; qualidade de tráfego, com ausência de instabilidade lateral e boa inscrição em curvas; interação veículo/guia com o mínimo de desgaste; baixo custo do projeto e manutenção reduzida (BARBOSA, 1999).

Em decorrência do aumento do número de veículos nos trens, o estudo dos efeitos dinâmicos na direção longitudinal tem recebido uma atenção especial por parte de técnicos e engenheiros do setor ferroviário.

A movimentação de um trem entre a origem e o destino requer várias operações que incluem acelerações, frenagens e paradas, praticadas sobre diferentes tipos de topografia e sob diversas condições ambientais. Esta operação resulta em interações dinâmicas entre os

veículos no sentido longitudinal e também entre os veículos e a via férrea. As forças longitudinais internas do trem, aquelas transmitidas entre os acoplamentos dos veículos, contribuem significativamente para as condições de segurança da operação ferroviária (BARBOSA, 1999).

Um veículo ferroviário, para Barbosa (1999), é considerado seguro quanto menor for sua propensão ao descarrilhamento. As métricas apresentadas pela Association of American Railroad (2007), aplicadas na fase de homologação e estudo investigativo de acidentes, são frequentemente aplicadas para classificar a segurança um veículo ferroviário em termos do comportamento dinâmico.

Segundo Barbosa (1999), forças longitudinais elevadas aumentam o risco de descarrilhamento em função das forças de compressão elevadas, gerando o efeito “canivete”, e devido às forças de tração elevadas em tombamentos internos; provocam dificuldades de circulação em decorrência da elevada distância de parada e inércia de partida; quebra de engates e dificuldade na operação de carga e descarga.

Um descarrilhamento pode ocorrer por diferentes causas, sendo a incidência durante a inscrição ou a saída de uma curva uma forma frequente. A simples relação analítica de Nadal, 1908, que quantifica a razão da força lateral L pela força vertical V , L/V , em relação ao atrito e ao ângulo de contato entre a roda e o trilho, é um dos critérios mais conservativos para verificar o limite de segurança da via (BARBOSA, 1999).

A via férrea por onde trafegam os trens é constituída por uma grade estrutural composta por dormentes fixados transversalmente aos trilhos (PORTO, 2004). Esta grade está geralmente assentada sobre pedra britada e solo compactado, que correspondem ao lastro e sublastro respectivamente. Este conjunto forma o leito que dá sustentação às cargas produzidas pela passagem dos veículos.

Portanto para o estudo de comportamento do trem em circulação por um determinado trecho da via, devem-se ter disponíveis as características da via na posição em que cada veículo está trafegando durante a sua marcha (NETO, 2010). À semelhança dos mapas topográficos de via, sugere-se uma subdivisão por trechos homogêneos contendo os parâmetros essenciais que caracterizam cada trecho.

Os principais esforços que interferem no dimensionamento da via, segundo Barbosa (1999), são oriundos das cargas de orientação vertical, gerados pela circulação dos veículos ferroviários sobre os trilhos. Para Hay (1982), a distribuição desses esforços ocorre por meio do contato aço/aço, constituído pelas rodas do veículo e pelos trilhos, suportados por dormentes sobre uma base ou um lastro, assunto que será analisado posteriormente.

A resistência de sustentação e qualidade da ferrovia tem influência direta com as condições de carregamento, podendo-se considerar os três parâmetros fundamentais: a carga por eixo, a tonelagem total e a velocidade de rolamento. Esveld (1989) considera que as condições da ferrovia são determinadas pelo grau de carregamento estático, adicionado a um carregamento dinâmico. Através da tonelagem total é possível prever a deterioração da via, e planejar trabalhos de manutenção e renovação do sistema.

A análise do comportamento dinâmico próprio do veículo é essencial em relação à sua estabilidade, ao comportamento nas curvas e ao conforto dos passageiros (KNOTHE, 1993). As suspensões dos veículos são projetadas para garantir modos de vibração abaixo de 10 Hz, o que proporciona um adequado isolamento dos passageiros quanto à vibração e também reduz a massa não suspensa efetiva, reduzindo as cargas dinâmicas no contato roda/trilho (KNOTHE, 1993). Acima de 20 Hz, a inércia da via aumenta sua importância enquanto a suspensão da composição isola todo o sistema, com a exceção da massa não suspensa. Assim, para esse autor, movimentos em curva, estabilidade e conforto são fenômenos que ocorrem em baixas frequências.

Para Ahlbeck (1993), quando forças dinâmicas atuam em frequências da ordem de centenas de Hz elas são reagidas pela inércia da roda primariamente. Isso proporciona forças em baixas frequências, que surgem a partir das ondulações, que são nocivas aos mancais dos rodéis. Segundo o mesmo autor, ondulações com comprimento na faixa de centenas de milímetros podem aumentar as forças no contato entre a roda e o trilho em mais de 300 kN, e provocar uma redução na vida útil dos mancais dos vagões na ordem de 50%.

Ligado ao movimento dinâmico, Knothe (1993), determina três origens para o fenômeno ruído: pode ser causado devido ao rolamento da composição ferroviária, pelo impacto e pelo processo do “guinchamento”. Os dois primeiros são provocados por irregularidades nas rodas e nos trilhos, enquanto o último aparece a partir de vibrações que ocorrem primeiramente durante a interação das rodas com o trilho em curvas de pequeno raio.

Para Knothe (1993), as mais altas frequências são aquelas associadas ao ruído devido ao contato entre roda e trilho, de forma que qualquer modelagem deste fenômeno deve ser satisfatória até o limite humano de percepção do ruído, ou seja, de 5000 Hz. Os problemas relacionados com as superfícies de rolamento da roda e do trilho e com os componentes da via permanente são provocados principalmente por forças verticais, que são mais significativas até um limite de 1500 Hz. Portanto, conforme Knothe (1993), uma modelagem da interação dinâmica entre veículo e via permanente no qual se deseja levar em consideração os efeitos dinâmicos devidos a irregularidades nas rodas e nos trilhos e o efeito sobre componentes da

via, deve-se ter como limite de frequência de interesse 1500 Hz e considerar apenas o carregamento vertical.

Outro estudo muito importante remete-se ao comportamento dinâmico lateral da caixa de um veículo ferroviário, sendo o comportamento de estabilidade e o conforto dos passageiros os assuntos mais importantes desse tema.

Geralmente os veículos são estáveis em velocidades baixas e à medida que essa grandeza aumenta seus valores, existe um ponto em que elas se tornam instáveis, o que normalmente ocorre em altas frequências. Essas instabilidades, para Setoguchi (2002) são oriundas pelo contato roda/trilho provenientes das irregularidades na via permanente.

Em relação ao conforto dos passageiros, existem duas faixas de frequência de vibração nas quais os seres humanos são mais sensíveis (NARAYANASWAMY, 1998). Até a frequência de 0,5 Hz problemas de mal-estar provocam enjoos e ânsia. Essas vibrações de baixa frequência são encontradas nos mais diferentes meios de transporte, como o marítimo (barco e submarino), o aéreo (avião e helicóptero) e o terrestre (automóvel e trem). Na faixa entre 0,5 Hz e 80 Hz, são ocasionados problemas de saúde e conforto.

De acordo com Narayanaswamy (1998), a melhora do conforto dos passageiros se faz atuando nas suspensões secundárias do trem, e a melhora da estabilidade e comportamento em curvas se consegue atuando nas suspensões primárias do veículo ferroviário. A suspensão primária é o primeiro filtro de vibrações, sendo constituído por molas que isolam as vibrações provenientes do contato roda/trilho e que são transmitidas à armação do truque.

A Foto 2 representa a suspensão primária em um trem.

Foto 2 - Suspensão primária



Fonte: Fotografia do autor.

A suspensão secundária nos veículos ferroviários de transporte de passageiros é feita com a utilização de bolsas de ar, pneumáticas. A função dessa suspensão, conforme

Narayanaswamy (1998) é isolar as vibrações de baixa frequência provenientes da armação do truque, garantindo a estabilidade do veículo e o conforto dos passageiros.

A Foto 3 mostra a suspensão secundária de uma composição ferroviária.

Foto 3 – Suspensão secundária



Fonte: Fotografia do autor.

No sistema massa mola, de acordo com Presthus (2002), quanto maior a rigidez da mola menor será a frequência natural e, dessa forma, maior será a sua deflexão. Sabendo que a energia potencial de uma mola é uma função da força aplicada e da deflexão, uma mola metálica que seja capaz de armazenar uma grande energia de ser volumosa, pois deve resistir a um grande esforço em um pequeno deslocamento, exigindo muito do material. E contra partida, para esse autor, uma bolsa pneumática é capaz de suportar uma grande carga sofrendo uma pequena deflexão em decorrência da compressibilidade do gás sob pressão e da elasticidade da bolsa elastomérica que o comprime.

A dinâmica das composições ferroviárias de acordo com Willis e Shum (1977), envolve dois tipos basicamente: os choques longitudinais e as vibrações originadas pela via. Choques longitudinais nos veículos são devido a ações de acoplamentos em pátios de classificação e passagens sobre corcundas em vias que causam altos impulsos de acelerações e excitações. Vibrações originadas pela via, embora usualmente não alcancem altas amplitudes de excitação podem ter um efeito prolongado nos veículos e cargas. Vibrações prolongadas podem sacudir ou mover a carga de sua posição inicial, aumentar os danos pela solicitação de contato roda/trilho e provocar uma instabilidade nas razões das forças entre roda e trilho, as

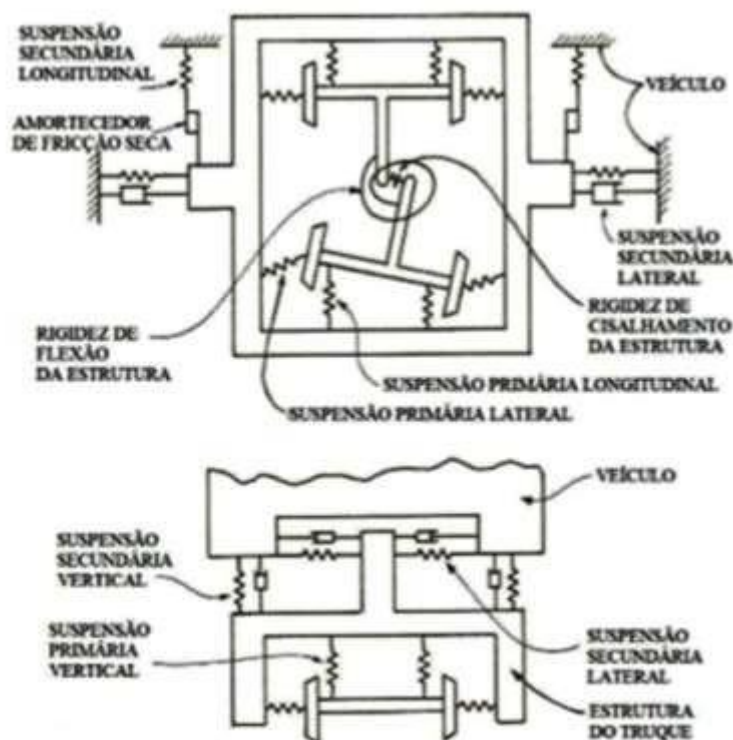
quais podem causar desequilíbrio do veículo bem como seu descarrilhamento (WILLIS; SHUM, 1977).

Veículos ferroviários convencionais usam truques de dois eixos. Os truques possuem como funções primordiais: o suporte com segurança do veículo sobre a cadeia inteira de operações; fornece orientação com operação estável em via tangente e flange livre em via curva; fornece isolamento de vibrações aceitáveis das irregularidades da via e adesão aceitável durante operações de potência e frenagem (DUKKIPATI, 2000).

Ainda observando Dukkupati (2000), os graus de liberdade necessários para o modelamento do truque de passageiros são: o deslocamento lateral e o ângulo de *yaw* do rodeiro, e os ângulos de *yaw* e de *roll* da lateral do truque. A travessa pode ter deslocamentos laterais, ângulos de *yaw* e de *roll*, relativos à estrutura do truque.

A Figura 6 representa o modelo de suspensão para truque de passageiros.

Figura 6 - Modelo de suspensão para truque



Fonte: Amyot, 1988.

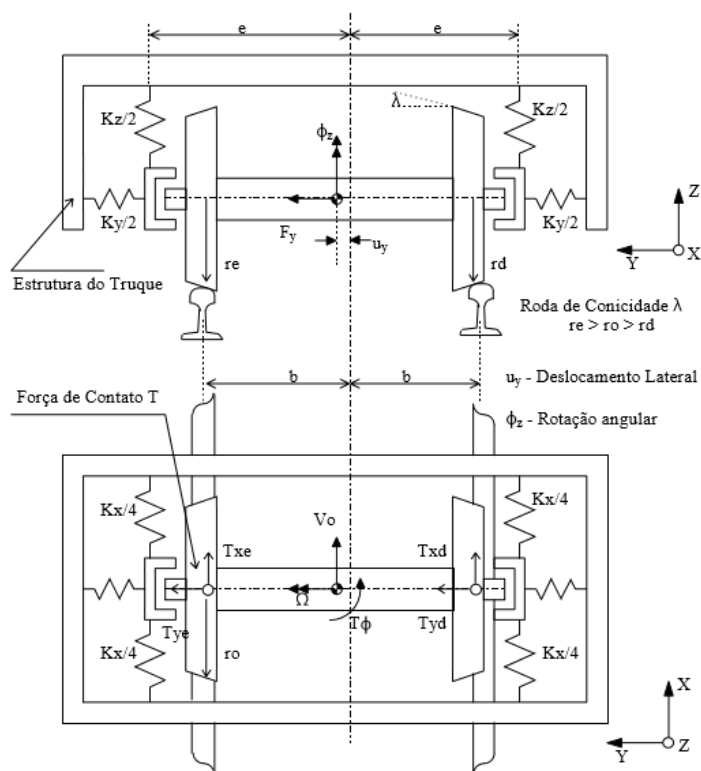
O rodeiro ferroviário é formado por duas rodas acopladas por um eixo, tendo como funções suportar a carga vertical, devido ao peso próprio do veículo, e permitir o direcionamento da composição ao trafegar por uma via com alinhamento irregular. Isso é obtido pela variação do raio de rolamento das rodas, que possuem um perfil transversal de rolamento cônico. Para Barbosa (1999), quando há deslocamento lateral do rodeiro em

relação à via, o ponto de contato na roda altera-se, gerando raios de rolamentos diferentes para cada roda. Como o rodeiro possui velocidade angular de rotação idêntica para as duas rodas, as velocidades tangenciais em cada ponto de contato são diferentes, o que provoca valores diferenciados de velocidades relativas entre a roda e a via. Sabendo que as forças tangenciais de contato entre os dois corpos são proporcionais às velocidades relativas, são gerados torques de alinhamento que garantem a recentralização do rodeiro, ou seja, permite ao rodeiro auto-direcionamento para acompanhar as irregularidades da via.

Nos truques de veículos de passageiros, Dukkpati (2000), afirma que os rodeiros são conectados às estruturas pelos principais elementos de restituição e dissipativos, como molas helicoidais e elastômeros. Isso reduz a transmissão de vibração ao corpo da composição ferroviária permitindo o movimento relativo do rodeiro em relação à estrutura do truque.

O modelo linear utilizado para descrever o comportamento dinâmico lateral do rodeiro, descrito pelos graus de liberdade lateral u_y e angular ϕ_z , é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Modelo da dinâmica do rodeiro



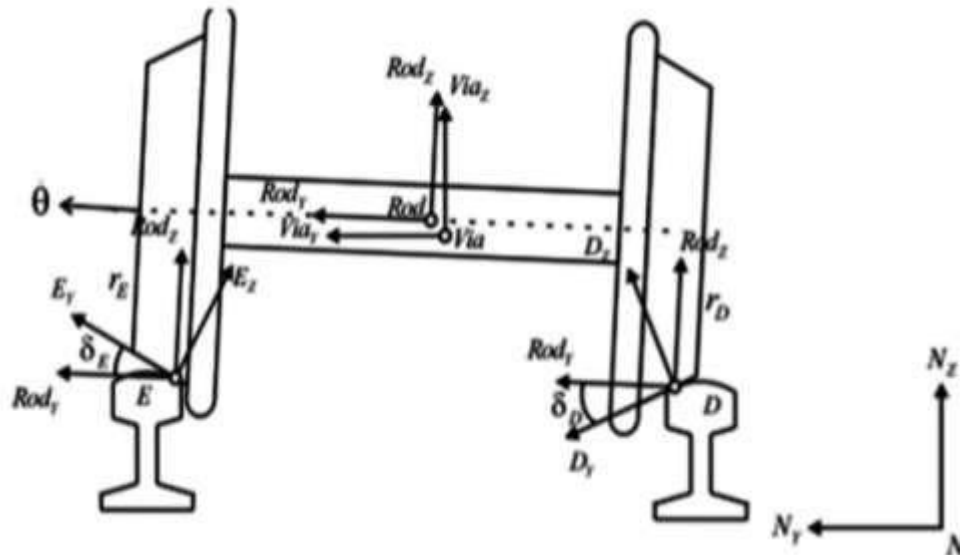
Fonte: Dukkpati, 2000.

Para declarar os graus de liberdade do sistema através das variáveis de estado, Barbosa (1999), define primeiramente um referencial inercial N , e outros quatro referenciais auxiliares, dois tangentes ao plano de contato, um que representa a trajetória e outro o

referencial do rodeiro. Esse autor também determina pontos para a aplicação de esforços, tais como as forças de contato e as forças externas.

A Figura 8 mostra o rodeiro e seus referenciais.

Figura 8 – Rodeiro e seus referenciais



Fonte: Barbosa, 1999.

O movimento dos rodeiros é capaz de excitar toda a estrutura do truque e do vagão influenciando o movimento de todo o veículo. Ao sofrer uma perturbação na sua posição lateral o rodeiro começa a passear em torno do centro da trajetória em um movimento oscilatório chamado de *hunting* (BARBOSA, 1999). Devido aos elementos que dissipam energia, esta oscilação é atenuada até o retorno ao centro da trajetória. Porém, à medida que se aumenta a velocidade do veículo esta dissipação de energia pode não ser mais suficiente e a amplitude de oscilação do rodeiro aumenta até que este começa a tocar os flanges no trilho podendo levar a descarrilamento (BARBOSA, 1999). Conforme Pombo (2005), a velocidade crítica é definida como a velocidade para a qual a oscilação do rodeiro é mantida sem que aumente nem diminua.

A dinâmica de sistema de multicorpos, conforme destacado por Shabana (2008), pode ser utilizada para o desenvolvimento e solução das equações não lineares que governam o complexo movimento das composições ferroviárias, os quais podem sofrer deslocamentos e rotações. Os movimentos destes componentes estão sujeitos a restrições cinemáticas que são resultados de juntas mecânicas, elementos de força e movimentos com trajetórias específicas. As equações cinemáticas são desenvolvidas utilizando os princípios da mecânica, as quais são resolvidas por programação ou simulação. Em um programa computacional de multicorpos

com possibilidades gráficas, as equações de movimento são automática e sistematicamente elaboradas e resolvidas.

2.12 Estado da Arte

Em muitos países, estudos sobre a corrugação em trilhos se estendem há mais de um século. No entanto, esse defeito ainda é um problema comum no sistema ferroviário. Várias análises indicam que suas causas são uma combinação de vários mecanismos, não tendo um único procedimento para seu tratamento.

O estudo realizado no metrô de Pequim mostra que o comportamento dinâmico do trem associado com o contato roda/trilho são os principais responsáveis pelo aparecimento das corrugações. Observações de campo, investigações e os resultados das medições na via comprovaram essa hipótese. Quando a velocidade média do TUE é superior a 60 km/h, como é o caso do metrô de Pequim, as interações dinâmicas do trem com os trilhos geram valores, no domínio da frequência, reconhecidos como ocasionados por essa ondulação (WEINING, 2014).

A corrugação dos trilhos em Pequim é um problema grave, pois gera um aumento de ruídos entre 15 a 20 dB que perturbam moradores que vivem nas redondezas das linhas e provocam desconforto aos passageiros. Esse desgaste tem provocado um aumento de trincas nos truques e nas rodas, quebra de dormentes e dos fixadores, acentuando a preocupação da segurança da operação.

A Foto 4 mostra um truque quebrado.

Foto 4: Truque quebrado



Fonte: Weining, 2014.

Atualmente, o principal método para o controle da corrugação é o esmerilhamento da via, que ocorre em intervalos regulares de tempo. No entanto, em virtude do número elevado

da frota e do intenso fluxo de passageiros no metrô de Pequim, esse desgaste se desenvolve tão rapidamente em algumas seções que o trilho precisa ser substituído (WEINING, 2014).

Como o comportamento dinâmico da interação do trem com a via desempenha um papel importante, foi realizado medições em faixas da via sem cargas, através da aplicação de uma excitação por impacto usando um martelo instrumentado, que se correlacionou bem com o espectro de frequências da resposta dinâmica do trilho quando os veículos ferroviários passam por ele. A Foto 5 a seguir registra o teste de excitação do trilho por impacto.

Foto 5: Teste de excitação do trilho



Fonte: Weining, 2014.

Para verificar os resultados e proporcionar um método para atenuar a corrugação, uma seção de testes foi instalada em um trecho da via. Ao monitorar os níveis de rugosidade dos trilhos, os resultados mostram que a metodologia empregada é eficaz para controlar o desenvolvimento da ondulação no metrô de Pequim (WEINING, 2014).

.

O comportamento dinâmico da via pode ser interpretado pela resposta de frequência. Essa resposta foi medida utilizando acelerômetro montado próximo ao boleto do trilho, próximo ao ponto de excitação, conforme a Foto 6 a seguir.

Foto 6: Acelerômetro no trilho



Fonte: Weining, 2014.

As respostas de pico foram encontradas na faixa de 100 – 400 Hz, sendo que os valores de 180 Hz, 280 Hz e 310 Hz correspondem ao domínio das frequências das respostas dinâmicas verticais do trilho, relacionadas com uma ondulação de comprimento de onda e uma velocidade de aproximadamente 60 km/h do trem. Cada curva de resposta foi produzida por uma média de 5 impactos (WEINING, 2014).

A utilização de um sistema de isolamento de vibração, intitulado sistema *Egg*, resultou em uma redução da corrugação em alguns relatórios experimentais, em função da elevada resiliência desse sistema (WEINING, 2014).

Os resultados indicaram que o comportamento dinâmico da estrutura pode contribuir para a formação de corrugação do trilho mesmo sobre o sistema de fixação *Egg*, influenciado também pela interação dinâmica trem/via, porém os valores coletados são inferiores quando o sistema *Egg* está presente. Este sistema está representado na Foto 7 a seguir.

Foto 7: Sistema de fixação



Fonte: Weining, 2014.

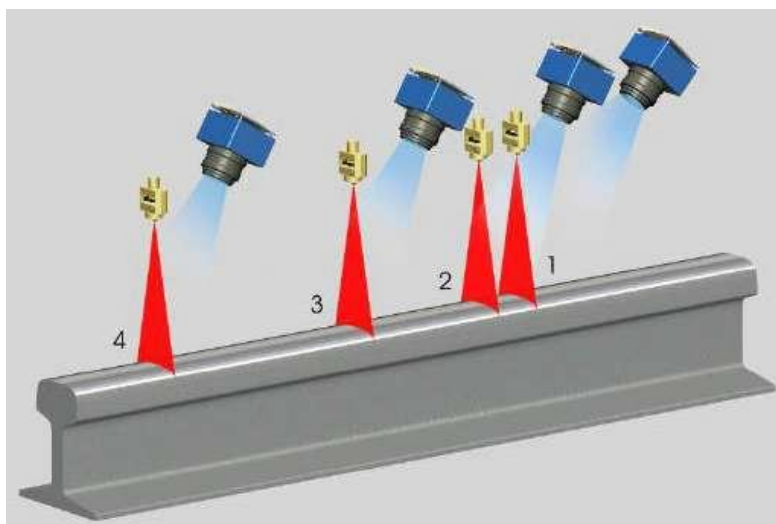
Com base neste estudo, pode-se concluir que aperfeiçoar a dinâmica do contato roda/trilho, removendo as ondulações na via, por meio do esmerilhamento, é uma solução eficaz para reduzir o crescimento da corrugação na via e que o sistema *Egg* atenua, mas não elimina o aparecimento e a propagação da corrugação na via (WEINING, 2014).

Em outro estudo, desenvolvido em Roma, na Itália, um equipamento é apresentado baseando-se em câmeras e na triangulação de lasers com três unidades, em que o primeiro e o terceiro representam o sistema de referência e o elemento central é usado para realizar a medição real da corrugação. Cada sistema de laser e câmera tem uma função correspondente que define a variação de funcionamento do equipamento em termos de comprimento de onda. As câmeras usam uma óptica assimétrica especial com campo de medição transversal de 100 mm e em um campo de medição vertical de 20 milímetros. Graças ao campo de ondulação transversal utilizado é possível detectar níveis de corrugação em toda superfície superior do

trilho. Para detectar toda a gama de valores de comprimentos de ondas da corrugação (10 - 1000 milímetros), deverão ser utilizados 4 sistemas de triangulação (MORGANO, 2014).

O sistema de medição é representado na Figura 9.

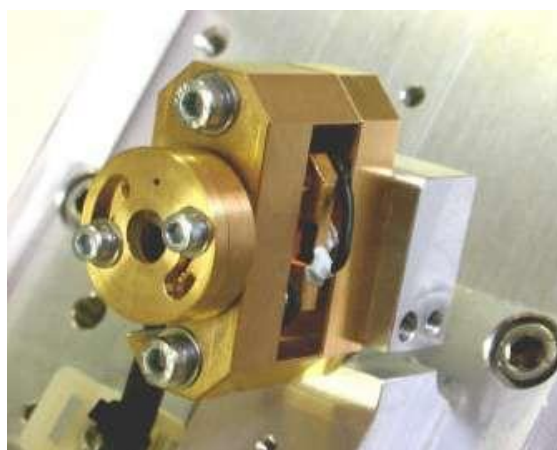
Figura 9: Sistema de medição em 4 pontos



Fonte: Morgano, 2014.

Os lasers possuem 685 nanômetros de comprimento de onda com uma potência máxima de 500 mW. O feixe de laser é gerado por uma fonte no estado sólido e expandido por meio de uma lente cilíndrica, com uma configuração específica para gerar uma distribuição uniforme do feixe. Cada laser é colocado em um suporte mecânico dedicado e integrado com um circuito eletrônico, a fim de garantir alta qualidade e estabilidade do feixe. As câmeras utilizadas são de alta velocidade e ligadas a sensores de matriz óptica. Essa arquitetura permite uma frequência muito elevada de amostragem, de até 5000 quadros por segundo (MORGANO, 2014). A Foto 8 a seguir exhibe o laser em detalhe.

Foto 8: Sistema do laser

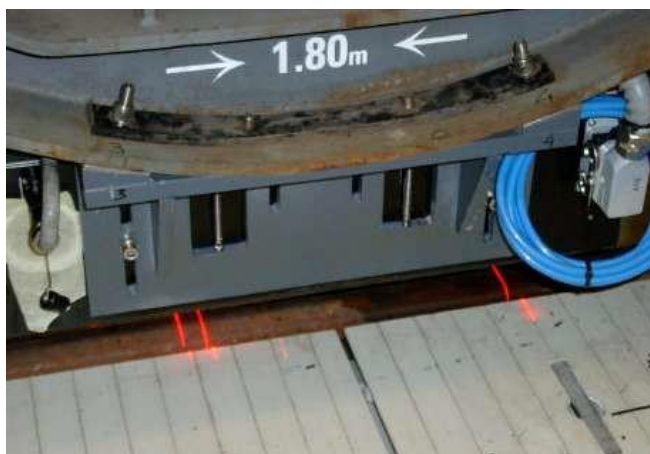


Fonte: Morgano, 2014.

O sistema de medição é projetado para suportar as vibrações mecânicas e os pulsos gerados pelo veículo para todo o seu ciclo de vida. Em caso de elevadas acelerações transversais na carroçaria do veículo, os sistemas de medição são projetados para acelerações de até 4 m/s^2 , com duração de até 50 milissegundos, e de até 2 m/s^2 para durações acima de 50 ms. Para a aceleração longitudinal, em operações de tração ou de frenagem, o projeto é que o sistema suporte até 7 m/s^2 para uma duração maior do que 50 milissegundos (MORGANO, 2014).

Em relação à instalação dos sistemas no veículo, este pode ser instalado por baixo do veículo ou no truque, conforme mostra a Foto 9.

Foto 9: Localização do equipamento no truque



Fonte: Morgano, 2014.

O equipamento é completamente estático e não necessita de qualquer sistema mecânico para o alinhamento ou centragem e a calibração da medição é automática.

Desde sua abertura, em 1995, a equipe de manutenção do metrô de Bilbao, na Espanha, estuda maneiras de atenuar a formação de ondulações nos trilhos. Um trabalho importante avaliou resolver o problema com a aplicação de modificadores de atrito no contato entre a roda e o trilho, com o objetivo de diminuir o crescimento da corrugação e assim aumentando os intervalos de tempo do esmerilhamento da via (VILAA, 2014).

A solução em longo prazo consiste na aplicação do modificador de fricção *Keltrack* na região de contato roda/trilho, reduzindo as variações de derrapagem das rodas sobre os trilhos, fato considerado um dos causadores das ondulações na via (VILAA, 2014).

O produto analisado foi aplicado no boleto do trilho, por determinado período de tempo, em uma via, e os resultados dos ensaios incluem a amplitude média das ondulações provocadas pelo crescimento da corrugação nessa via comparados com as amplitudes geradas pela corrugação de uma via sem o modificador de atrito (VILAA, 2014).

Para um julgamento ideal foi necessário comparar os resultados obtidos sob as mesmas condições, com apenas uma variável se alterando, que seria a presença ou não do lubrificante. Geralmente, isso é difícil de acontecer, mas este ideal foi alcançado. O acompanhamento das ondulações foi realizado em duas curvas separadas, com as mesmas condições de corrugação (VILAA, 2014).

Os componentes do lubrificante consistem em materiais secos, sem a presença de óleo ou orgânicos voláteis, não sendo inflamáveis ou tóxicos. O material de resina foi projetado para queimar sob altas temperaturas, como as que ocorrem na área de contato roda/trilho. O produto dessa queima gera um micro filme que preenche as asperezas nas superfícies do metal, proporcionando uma superfície mais suave (VILAA, 2014).

O intuito foi reduzir o atrito na parte superior do trilho, de 0.4 – 0.6, para um valor em torno de 0.35, o que não prejudicaria a tração ou a frenagem do trem.

As medições das progressões da corrugação foram feitas em curvas com raios inferiores a 200 metros, utilizando um equipamento específico para delinear perfil de trilho, o *RailProf*.

O *RailProf* é um equipamento de precisão para medir a geometria longitudinal do trilho, mostrado na Figura 10 a seguir.

Foto 10: Equipamento em detalhe



Fonte: VILAA, 2014.

Os dados foram colhidos antes e depois da aplicação do lubrificante no boleto dos trilhos.

Após o esmerilhamento, foi aplicado o lubrificante no boleto dos trilhos e a amplitude média das ondulações aumentou em 0.1 mm ao longo de 18 meses em uma via de teste. Em outra via de teste, onde não foi aplicado o *Keltrack*, a amplitude média cresceu 0.7 mm no mesmo período (VILAA, 2014).

A partir desses testes, pode-se concluir que o lubrificante resultou em uma redução da taxa de crescimento da corrugação ao formar um coeficiente de atrito ideal sem perda de tração e frenagem e diminuiu o nível de ruído para os usuários do metrô (VILAA, 2014).

Os principais pontos de um artigo sobre esmerilhamento são apresentados a seguir. Este procedimento é típico da manutenção de vias férreas, em que tijolos abrasivos são usados para restaurar o perfil do trilho, eliminando defeitos tais como ondulações, fissuras de fadiga e marcas de desprendimento de material. Neste estudo, o esmerilhamento foi realizado durante 10 anos, em 22 curvas de uma via comercial do metrô de Medellín, na Colômbia. Inspeções periódicas foram feitas para identificar os principais mecanismos de desgaste na via e os defeitos foram classificados em corrugação, fadiga e perda de material do perfil do trilho (TORO, 2014).

Neste sistema ferroviário, os procedimentos de manutenção visam preservar o perfil dos trilhos ao mudar a microestrutura e a rugosidade da superfície, influenciando no desempenho do desgaste do trilho. Demonstrou-se que, após o esmerilhamento, uma camada dura não temperada de martensita pode ser formada no boleto do trilho devido ao aquecimento e resfriamento rápido (TORO, 2014).

Além disso, a deformação plástica desempenha um papel no endurecimento da subsuperfície, podendo alcançar valores de dureza superior a 400 HV.

Uma vez que o desgaste artificial causado pelo esmerilhamento controla as taxas de desgaste reais dos trilhos, torna-se essencial executar este procedimento quando altas taxas de degradação são encontradas sistematicamente na via (TORO, 2014).

Baseando-se nessa ideia, vários estudos têm focado sobre os parâmetros que afetam os procedimentos do esmerilhamento. Para exemplificar, no trabalho realizado por De Vries (2013), analisou-se que esta prática preventiva reduz os custos de manutenção, principalmente em trechos de raios inferiores a 400 metros e aprimora o contato roda/trilho. Já Zapata (2012), estudou o efeito da velocidade e da pressão do trem esmerilhador sobre os trilhos, concluindo que dependendo das condições, os tijolos abrasivos podem causar novas fissuras no boleto dos trilhos.

Os resultados de várias análises mostram que características potencialmente prejudiciais, tais como micro fissuras ou regiões deformadas na superfície dos trilhos podem ser removidos com uma prática adequada de esmerilhamento. No entanto, se novos defeitos forem induzidos em função de uma operação mal executada, as taxas de desgaste podem ser aceleradas diminuindo o tempo de vida dos trilhos (TORO, 2014).

Vários parâmetros da via, como o raio da curva, superelevação e o tipo de perfil, foram avaliados para compreender os efeitos do esmerilhamento.

Uma das principais funções do reperfilamento é restaurar o perfil adequado do trilho para que o contato com a roda seja o mais próximo das condições teóricas.

Os resultados desse estudo mostram que a fadiga aparece preferencialmente no trilho externo e a corrugação no interno, obrigando o esmerilhamento da via por razões distintas.

Após a análise dos dados de reperfilagem obtidos em 10 anos de inspeções em uma via férrea de Medellín, pode-se concluir que a fadiga, o *spalling* e os defeitos em soldas são os principais problemas que acometem os trilhos internos e externos de uma via. No entanto, diversos defeitos relacionados com a fadiga não podem ser removidos com o processo de reperfilamento, o que foi comprovado com a inspeção da seção transversal dos trilhos (TORO, 2014).

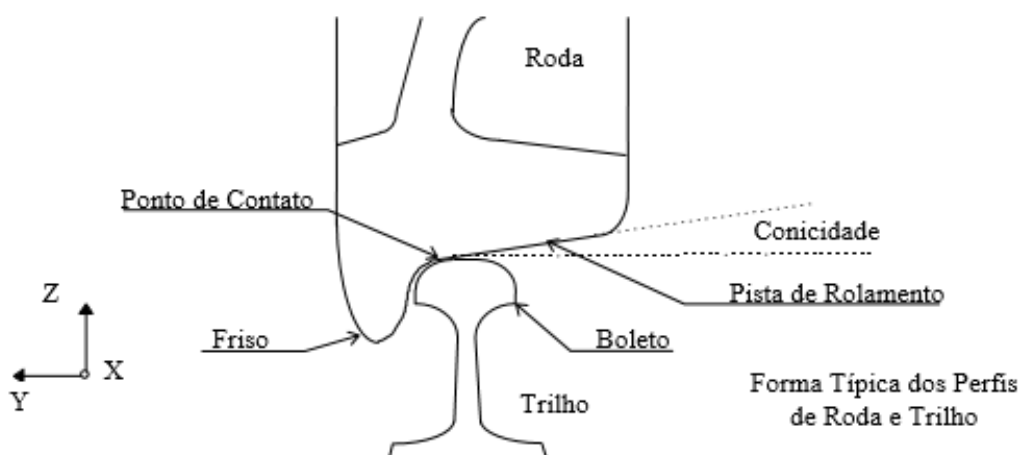
De um modo geral, o número de operações de manutenção aumentou com a superelevação e diminuiu com o aumento do raio da curva. A via analisada opera sob uma condição tribológica grave, sendo que o intervalo de tempo em que ocorre o esmerilhamento é de 2 a 3 vezes menor quando comparado com outros exemplos encontrados na literatura acadêmica (TORO, 2014).

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Contato roda/trilho

A interação roda/trilho é um elemento importante que diferencia veículos ferroviários de outros sistemas em aplicações multicorpos. A interação desse sistema é descrita em termos de forças de contato, bem como outras forças e variáveis cinemáticas, acarretando o *hunting*, o qual é a origem para as oscilações laterais e do ângulo de direção (*yaw*), que contribuem para a instabilidade do veículo, particularmente em certas velocidades de operação. A Figura 10 representa este contato.

Figura 10 – Contato roda/trilho



Fonte: Barbosa, 1999.

O contato entre a roda e o trilho, fornece a interface entre o veículo que se movimenta e a infra-estrutura estacionária. O contato ocorre em uma área, aproximada, de 0,5 cm², o que resulta em elevados valores de tensões nessa região. Geralmente, de acordo com Magalhães (2002), a tensão de contato supera o limite de escoamento do aço padrão. Como o valor desse limite é praticamente igual ao limite de esmagamento, a roda e o trilho se deformam, aparentando se encontrarem em regime plástico.

Esse componente da via sofre os efeitos de vários tipos de solicitações, que podem ser classificadas em verticais, longitudinais e transversais (KLEIN, 1995).

Dentro dos esforços verticais, estão incluídos: a carga devido ao peso sobre as rodas, as forças centrífugas verticais (massas excêntricas rodantes) e o movimento de trepidação devido às irregularidades da via. Dentre os esforços longitudinais, há os devidos à restrição da dilatação térmica dos trilhos, os esforços ocasionados pela flexão dos trilhos, as forças

oriundas do atrito da roda com a via e a frenagem. Quanto aos esforços transversais, o mais importante é a força centrífuga que ocorre nas curvas da via (KLEIN, 1995).

Para Magalhães (2002), não ocorre ruína nesses elementos porque a deformação plástica depende do tempo em que as cargas são aplicadas e também porque as superfícies se tornam mais duras e o seu limite de escoamento aumenta após um volume de tráfego ferroviário.

Conforme Grassie (2007), devido a elevada rigidez do contato, em função do tipo de material envolvido, aço, e de mudanças expressivas nas propriedades dessa interação devido a geometria dos perfis, as forças tangenciais de contato podem atingir valores elevados, com rápida variação de intensidade e direção.

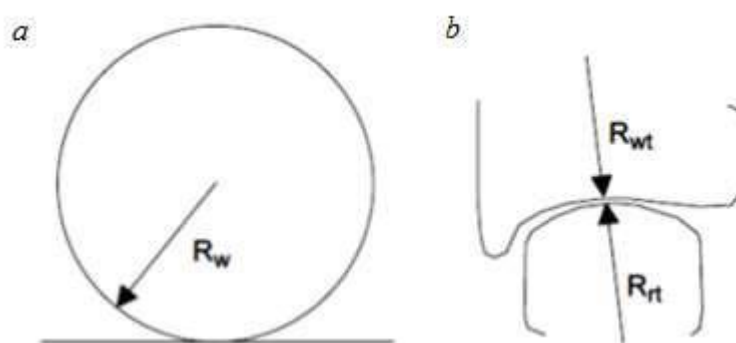
Esses esforços proporcionam, entre outros efeitos nocivos, a degradação da superfície dos trilhos, como a corrugação, que é o alvo deste trabalho.

A rigidez do contato roda/trilho é causada pela deformação elástica que cria uma área de contato que aumenta com o crescimento do valor da força, função explicada pela teoria de Hertz. Como consequência, a relação entre força e o deslocamento não é linear. Hertz definiu a rigidez entre os corpos em contato para seus raios de curvatura no ponto em que a roda toca o trilho. Para simplificar a análise, pode-se estudar o caso mais simples deste contato, que é o de uma esfera em contato com um plano (DUKKIPATI, 2000).

Se a roda tem um raio de curvatura R_w na direção de rolamento, R_{wt} na direção transversal, sendo positivo para o lado convexo, e o trilho tem um raio transversal R_{rt} e raio R_r na direção do rolamento (usualmente infinito) o contato irá existir sobre uma elipse (VIDON, 2012).

A Figura 11 representa os raios da roda nos pontos de contato.

Figura 11 – Raios nos pontos de contato



Fonte: Vidon, 2012.

Assim, para Vidon (2012), tem-se o semieixo a no sentido do rolamento e o b na direção transversal expresso por:

$$a = \sigma_1 \cdot \left(\frac{3 \cdot F_0 \cdot R_0}{2 \cdot E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$b = \sigma_2 \cdot \left(\frac{3 \cdot F_0 \cdot R_0}{2 \cdot E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Sendo F_0 é a força normal, E' é o módulo de elasticidade dado pela equação (3) com ambos os corpos assumindo ter o mesmo material (E é o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson) e R_0 é um raio de curvatura efetivo no contato dado pela expressão (4):

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_{wt}} + \frac{1}{R_r} + \frac{1}{R_{rt}} \right) \quad (4)$$

As tensões σ_1 e σ_2 são descritas nas equações a seguir:

$$\sigma_1 = \left(\frac{2 \cdot g^2 \cdot E(e)}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{2 \cdot E(e)}{\pi \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Para a determinação da rigidez da mola de modo simplificado, Vidon (2012) adota que a área de contato é circular, ou seja, a e b são iguais. Desta forma, pode-se calcular a rigidez K_H pela equação a seguir:

$$K_H = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot E^2 \cdot Q \sqrt{R_w \cdot R_r}}{2 \cdot (1 - \nu^2)^2}} \quad (7)$$

Sendo, E é o módulo de elasticidade, ν o coeficiente de Poisson, Q a carga vertical, R_w o raio da roda e R_r o raio do trilho.

Essa simplificação é interessante para este estudo, pois a consideração de uma região elíptica de contato acarreta em expressões matemáticas complexas.

3.2 Corrugação

A passagem de uma roda sobre o trilho é definida como um evento irreversível, resultando no desgaste da superfície de contato através da descolagem de pequenas partículas metálicas, antes de se atingir o estado final de desgaste por fratura de fadiga desses elementos (GRASSIE, 2007).

Assim, neste reduzido contato, existem alguns fenômenos indesejáveis, que podem criar irregularidades, seja alterando o perfil da roda ou do trilho, que reduzem o comportamento dinâmico do veículo. Essas irregularidades, aumentam os esforços de contato, vibrações e ruído, que resultam em desconforto aos usuários do metrô, por exemplo.

Na via férrea, os trilhos vibram, produzem ruído e deformam-se sob o efeito das cargas aplicadas sobre eles. A acumulação de deformações, oriundas dos desgastes provocados pela passagem regular da frota de trens sobre a via, resulta em uma degradação progressiva dos perfis transversal e longitudinal (GRASSIE, 2007). Quando na superfície de rolamento dos trilhos, se detectam deformações regularmente afastadas, observa-se o fenômeno do desgaste ondulatório ou corrugação.

A corrugação, ao deformar o perfil do trilho, provoca o aparecimento de pontos de pressão unitária elevada, onde se iniciam defeitos no nível do plano de rolamento, tais como: aplanamento do boleto do trilho, rebarbas, escamação, esmagamentos e fissuras transversais. As deformações, provocadas pelo desgaste ondulatório, amplificam todas as solicitações à estrutura do trilho, particularmente nos locais em curva ou onde se verificam os maiores esforços de aceleração e frenagem (GRASSIE, 2007). A Figura 12 retrata a evolução da corrugação em um trilho em função do contato com a roda.

Figura 12 - Evolução da corrugação em trilho em função do contato com a roda



Fonte: CBTU, 2013.

Vários estudos têm sido feitos para uma melhor compreensão da corrugação, com o intuito de que seja possível prevenir e reduzir este processo. Existe o entendimento de que a corrugação não é um processo simples, não tendo uma única causa e muito menos uma única solução.

As suas diversas causas apontam para um elevado número de variáveis envolvidas no processo. Sob a passagem de uma carga rolante, produzem-se vibrações transversais no trilho, auxiliadas pelo formato cônico das rodas e pela permanente auto-centragem destas em retas e em curvas do traçado, com uma frequência que entrará em ressonância com o período da variação de pressão específica sobre o trilho (GRASSIE, 2007). Sendo constante a força tangencial no ponto de contato, as variações do coeficiente de atrito (que é uma função da velocidade angular da roda), produzem pequenos escorregamentos instantâneos, que determinarão o aparecimento do desgaste ondulatório dos trilhos (GRASSIE, 2007).

Assim, as variáveis analisadas neste estudo que influenciarão nas causas do aparecimento dos desgastes ondulatórios da superfície do trilho são: a velocidade da composição ferroviária, a geometria da via (raios de curvatura e superelevação), a composição e os tipos de trilhos existentes na via, a interação entre o perfil longitudinal do trilho e da roda, e finalmente a frequência de passagem da frota sobre a linha férrea. Consequentemente, as características que a corrugação apresentará (perfil da onda, frequência, período, amplitude e do ponto de contato roda/trilho) estarão associadas ao agrupamento dessas variáveis.

A Foto 11 mostra a corrugação na via de Belo Horizonte.

Foto 11- Corrugação na via de Belo Horizonte



Fonte: Fotografia do autor.

Na crista da deformação ondulatória, a estrutura metalográfica é idêntica àquela que se observa normalmente na superfície de rolamento, em regiões onde não existe o defeito. A superfície é brilhante e dura, o que indica que nas cristas das ondas de deformação, a roda está completamente em contato com o trilho e não há deslizamento relativo entre as superfícies. Por outro lado, a superfície dos trilhos é mais escura na região dos vales de deformação, tendo o material menor dureza, como se verifica em regiões do trilho pouco trabalhadas pelo tráfego. Há indícios, portanto, de que a ação das rodas é distinta nessa região, em virtude de uma inscrição que permite deslizamento relativo (RIVES, 1977).

São identificados seis tipos de desgaste ondulatório, de acordo com Grassie (2007), que possuem significativas diferenças entre si, a saber:

-Heavy-haul corrugation: Este tipo de corrugação de onda longa, está associado a trilhos que suportam elevadas massas por eixo, acima das 15 toneladas, com cargas uniformes, velocidades pequenas, regulares e constantes. Este tipo de desgaste ondulatório tem como origem irregularidades da própria via (juntas, soldaduras, irregularidades e descontinuidades). Ele aparece na fila externa das curvas, não estando necessariamente ligado somente a curvas, podendo existir em retas do traçado. O seu comprimento de onda varia entre 200 e 300 mm, e possui uma frequência de 30 Hz, devido à baixa velocidade dos comboios. É um desgaste caracterizado por grande deformação plástica.

-Light Rail corrugation: Trata-se de um desgaste caracterizado por um pequeno comprimento de onda. Surge de materiais circulantes que, apesar de baixo peso por eixo, apresentam frotas homogêneas de comportamento similares, elevadas frequências entre as composições ferroviária e um maior número de eixos motores. É um desgaste caracterizado por uma grande profundidade da cavidade (amplitude) que podem atingir valores de 1 mm de profundidade.

-Resonance corrugation: Este desgaste ondulatório, definido também como P2, está mais associado aos sistemas elétricos. Sendo o segmento de veículos ferroviários que possuem menor peso por eixo, estes sistemas apresentam características de frequentes descolamentos pontuais, derivado do tipo de movimentos, baixo peso e grande potência disponível nas rodas. Este tipo de desgaste ondulatório pode ser bastante severo em curvas de raios menores e em retas do traçado.

-Rutting: Este tipo de corrugação está muito associada aos veículos pesados que possuem curvas de pequeno raio, onde as velocidades praticadas se encontrem abaixo dos valores de projeto das curvas. Este desgaste aparece essencialmente na fila interna das curvas e em retas onde os esforços de aceleração e frenagem são severos. Discretas irregularidades

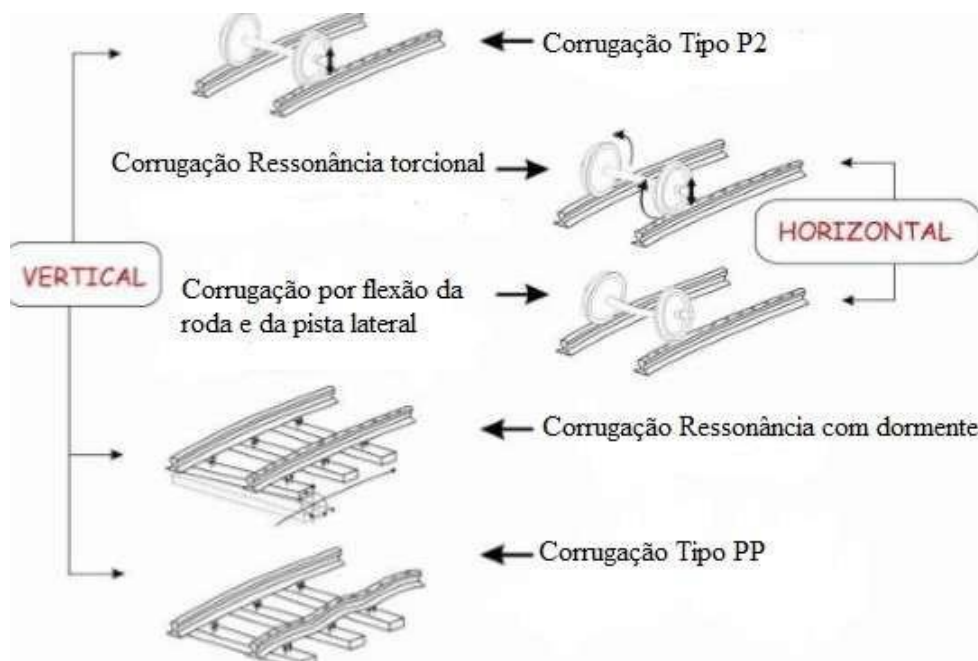
podem servir de elemento iniciador deste desgaste, que apresenta um comprimento de onda uniforme em aparência com pequena modulação. Este desgaste, uma vez detectado, surge com rapidez, podendo atingir dezenas de milímetros. É perceptível um pó fino na parte superior do trilho.

-Pinned-pinned resonance: O termo “*roaring rails*” denuncia este tipo de desgaste ondulatório, principalmente nas linhas em que se praticam velocidades elevadas (de 160 – 200 Km/h). Trata-se de um desgaste associado ao material rodante de média massa por eixo (entre 10 a 20 toneladas), visível a olho nu em curvas suaves de grande raio, onde o material circulante negocie a curva sem que o verdugo (flange) da roda toque o lateral do trilho.

-Trackform: Trata-se de uma corrugação que não pertence aos grupos referidos anteriormente, que estão associados a tipos de via sem balastro específicos, onde as bases das travessas se encontram assentadas em “pantufas” aborrachadas, afim de evitar a propagação de vibrações à plataforma/pavimento, em curvas abaixo dos 400 metros de raio.

Esses tipos de corrugação são ilustrados a seguir, na Figura 13.

Figura 13 – Tipos de corrugação



Fonte: Martins, 2010.

O desgaste ondulatório provoca inúmeros efeitos negativos, como: degradação dinâmica da disposição geométrica da via, fadiga dos trilhos com o consequente desenvolvimento e propagação dos defeitos internos, afrouxamento e desgaste das fixações, desenvolvimento de fissuras e quebra dos dormentes, além do efeito negativo nos elementos

de suspensão dos veículos por ressonância e aumento substancial da contaminação sonora ambiental e também no interior do veículo ferroviário (PANADES, 1996).

Os desgastes em trilhos são uma consequência natural do seu uso em serviço, mas pode ser sensivelmente atenuado se o traçado for projetado com amplos raios de curvatura (acima dos 1000 metros) e com rampas suaves (com inclinação abaixo de 0,5%), já que o agente causador é o atrito desenvolvido tanto na inscrição dos rodeiros dos truques nas curvas, como também nas frenagens que ocorrem nas longas descidas do percurso dos trens (JEONG, 1998).

A literatura ferroviária comprova que, se não forem tomadas as medidas corretivas de controle dos desgastes dos trilhos, ocorre uma deterioração sem recuperação, o que obriga sua substituição.

3.3 Desgastes em função da geometria

Irregularidades ou variações na geometria da via, para Dukkipati (2000) resultam de forças cumulativas que deformam a estrutura da via durante seu tempo de vida. Essas variações muitas vezes iniciam com pequenas imperfeições no material, tolerâncias e erros na fabricação dos trilhos e outros componentes da via. Desnivelamentos no terreno e erros em levantamentos topográficos durante o projeto e construção da via também geram essas variações.

De acordo com Dukkipati (2000), na dinâmica ferroviária, as excitações de entrada vêm das variações da geometria da via. Para um estudo das interações veículo/via e avaliar a qualidade de marcha, desempenho do veículo, conforto dos passageiros e danos à carga, é necessário representar precisamente as variações da geometria da via.

Para definir irregularidades em vias tangentes, Frýba (1996) apresentou uma análise de quatro parâmetros: o alinhamento, que é a média da posição lateral dos dois trilhos; a variação de bitola, definida como a distância entre os dois trilhos; o nível cruzado, que é a diferença entre a elevação dos trilhos e o nivelamento vertical, que é a média da elevação dos dois trilhos.

As divergências desses parâmetros dos valores nominais são designados por Frýba (1996), como irregularidades da via tangente.

O erro de nivelamento refere-se como o desvio do trilho esquerdo ou direito em um perfil uniforme. Isso resulta principalmente da existência de juntas baixas ou cargas térmicas

impostas na via. Para se obter o erro de nivelamento para ambos os trilhos, o nível cruzado pode ser usado (DUKKIPATI, 2000).

O erro de alinhamento, segundo Frýba (1996), existe no plano lateral da via e usualmente resulta de deformidade inicial do trilho, construção da via, procedimentos de manutenção e movimentos laterais acumulados da via sob tráfego.

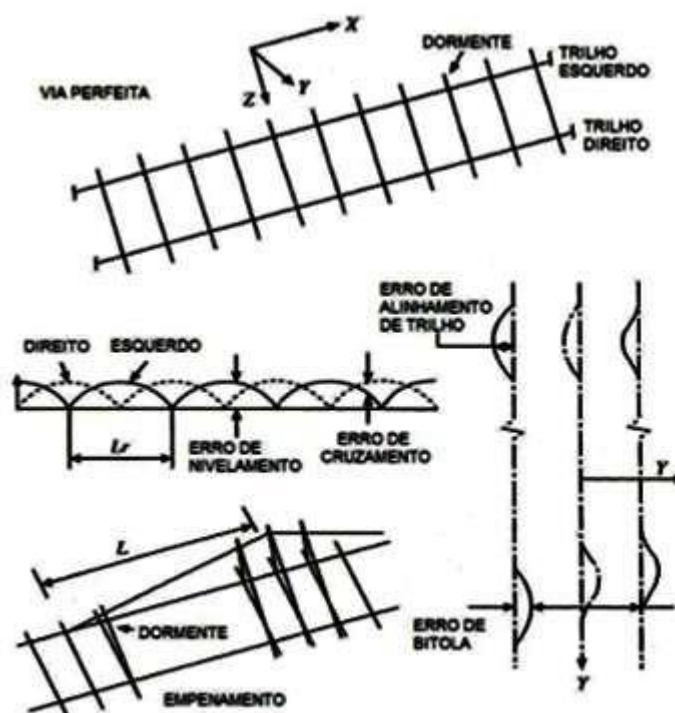
O erro de bitola existe no plano lateral da via e resulta primeiramente da construção da via, procedimentos de manutenção e de movimento lateral relativo dos trilhos sob condições de tráfego, sendo que erros de bitola sempre acompanham erros de alinhamento (FRÝBA, 1996).

O empenamento é definido como a mudança no nível cruzado sobre um determinado comprimento de via. É resultado de cargas térmicas impostas à via, assentamento cruzado dos dormentes e cargas sobre a via. Geralmente, o empenamento da via somado aos erros de nivelamento são responsáveis pelo levantamento da roda (FRÝBA, 1996).

Além das irregularidades estáticas, a via permanente também possui irregularidades dinâmicas causadas pela passagem do veículo sobre a mesma. A flexibilidade da via pode ser modelada por uma compilação de baixas frequências e um sistema massa-mola de um grau de liberdade para altas frequências (DUKKIPATI, 2000).

Esses parâmetros são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros de irregularidades de via



Fonte: Dukkupati, 2000.

Ainda conforme Frýba (1996) podem-se classificar as irregularidades como: Irregularidades periódicas: São irregularidades devido a achatamento das rodas ou corrugação dos trilhos. Podem ser representadas por séries trigonométricas de Fourier; Irregularidades isoladas: São irregularidades comuns na via e podem ocorrer por muitas razões como junta de trilhos, nos aparelhos de mudança de via e outras situações de singularidade; Irregularidades randômicas: São as rugosidades inerentes aos trilhos e as rodas, existindo em todas as linhas férreas e influenciam o desempenho dinâmico dos veículos da via. Ocorrem de forma aleatória devido ao desgaste, manutenção insuficiente e folgas da via permanente.

3.4 Outros defeitos e desgastes nos trilhos

As anomalias no trilho podem se manifestar interna ou externamente. As primeiras se vinculam a defeitos metalúrgicos adquiridos durante o processo de fabricação (dos trilhos ou das soldas) e as anomalias externas são aquelas originadas pelo uso do trilho em serviço (MAGALHÃES, 2007).

Os defeitos internos podem ser previamente detectados através de inspeção por ultrassom, raios-x ou por percussão de um martelo que quando emite um som característico, puro e duradouro, indica que há grande probabilidade de não haver defeito. Esses defeitos só se tornam visíveis quando suas dimensões são grandes o suficiente para aflorarem no boleto ou nas faces da alma, isto é, quando os trilhos estão na iminência de uma fratura (GRASSIE, 1997).

Os defeitos internos são perigosos por progredirem em função da carga trafegada e a fratura pode ocorrer durante a passagem do trem, caso não sejam removidos a tempo. Os defeitos externos são facilmente detectáveis, permitindo que sua degradação em defeitos mais graves seja monitorada durante o processo de sua formação. Considerando que na iminência de uma fratura as anomalias internas podem mostrar indícios externos, neste trabalho serão citadas os defeitos longitudinais, transversais, superficiais e os desgastes da área do boleto (COIMBRA, 2006).

A Norma NBR 7640 define os tipos de defeitos de trilhos que podem acometer a via férrea.

Os defeitos longitudinais são aqueles que se manifestam no sentido do comprimento do trilho. As principais anomalias desta natureza são: trinca vertical, trinca horizontal, bolha (ou vazio), trinca na concordância do boleto/alma, trinca na concordância da alma/patim e trinca estelar na furação (SEMPREBONE, 2006).

Todos esses defeitos formam-se durante a solidificação do aço devido a segregação ou inclusão de impurezas e outros componentes da liga e contribuem para a perda da resistência mecânica do trilho. A melhor maneira para detectar esses defeitos é através da inspeção por ultrassom (SEMPREBONE, 2006).

Esses defeitos são conceituados a seguir, segundo o mesmo autor:

-A Trinca Vertical ou *Vertical Crack (VCR)*, se desenvolve de modo progressivo longitudinalmente ao centro do boleto com crescimento acelerado após afloramento da trinca.

-A Trinca Horizontal ou *Horizontal Crack (HCR)*, se desenvolve de modo progressivo longitudinalmente e paralela ao topo do boleto e apresenta crescimento acelerado ao longo do comprimento.

-Bolha (*BOL*) é uma fenda vertical localizada na alma do trilho causada por gás contido em uma cavidade interna.

-A Trinca na Concordância Boleto/Alma ou *Cracking at head/web fillet radius (CHW)*, inicia-se nas partes externas dos trilhos na região das suas junções podendo gerar uma separação boleto/alma.

-A Trinca na Concordância Alma/Patim ou *Cracking at web/foot fillet radius (CWF)*, é uma trinca horizontal que se manifesta no extremo do trilho e que tem a tendência de separar a alma/patim.

-A Trinca Estelar na Furação ou *Bolt Hole Crack (BHC)*, se origina no furo de fixação da tala ou no furo do trilho e progride no sentido longitudinal em direção ao furo seguinte ou muda de direção indo para o patim ou boleto.

Os defeitos superficiais se manifestam na superfície do boleto, na área de rolamento das rodas. São defeitos de elevada importância por comprometerem os trilhos e as rodas, componentes de elevado custo de manutenção na ferrovia. Em geral, por serem externos, são evidenciados visualmente, logo podem ser removidos por ações preventivas ou corretivas (VIDON, 2012).

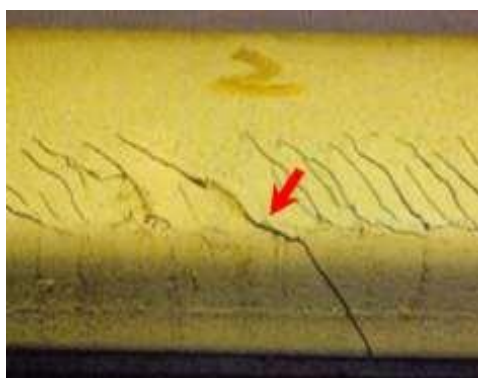
Os principais defeitos desse grupo, de acordo com Vidon (2012) são: fissuração do canto da bitola (*head checkings*), escamação do boleto (*flaking*), estilhamento do canto da bitola (*spalling*), despedaçamento do canto da bitola (*shelling*), depressão (*squat* ou *dark spot*), patinagem (*whell burn*), cavidades (*tache ovals*) e deformação plástica do boleto (*rail plastic flow*).

Tendo em vista que as ações dinâmicas resultantes da circulação dos trens se manifestam de formas diversificadas, tais como choques, arrastamento longitudinal de rodas nas curvas ou frenagens, atrito de escorregamento transversal das rodas associado com a

grande pressão do contato roda/trilho, esses defeitos raramente se apresentam individualmente, mas sim, combinados entre si ou com defeitos de outros grupos (COIMBRA, 2006).

-Fissurações no canto da Bitola (*Head Checkings*): consiste no aparecimento de trincas capilares de pequena extensão que se manifestam transversalmente ao boleto (no sentido da largura), próximas do canto superior da bitola, causadas pela grande pressão das rodas contra os trilhos, principalmente quando a carga por eixo dos vagões é igual ou superior a 30 toneladas (SEMPREBONE, 2006). A Foto 12 mostra a fissuração no trilho.

Foto 12: Fissuração no canto da bitola



Fonte: Semprebone, 2006.

-As trincas eventualmente podem se juntar, gerando a perda de material conhecida como floculação, conforme Knutton (2004). Na floculação, lamelas de metal se despreendem da superfície de rolamento, sendo que a profundidade do defeito pode atingir vários milímetros, resultando em uma gradual depressão nessa superfície (KNUTTON, 2004). A Foto 13 representa a floculação.

Foto 13: Floculação



Fonte: Knutton, 2004.

-Escamação do Boleto (*Flaking*): é a separação de finas e pequenas lâminas do aço que se interpõem nas trincas capilares (Head Checks). É causada pelas elevadas tensões que

resultam do contato roda/trilho (GAVIN, 2011). Na Foto 14 é possível identificar a escamação no trilho.

Foto 14: Escamação do Boleto



Fonte: Gavin, 2011.

-Estilhamento do canto da Bitola (*Spalling*): este defeito está associado à escamação do boleto, caracterizado pelo deslocamento de massa ou porções de aço do trilho próximas do canto da bitola, motivadas pelas pesadas cargas de rodas atuando sobre áreas do trilho em que o aço está fragilizado entre trincas superficiais que se aprofundaram (GAVIN, 2011). O estilhamento é apresentado na Foto 15.

Foto 15: Estilhamento do canto da Bitola



Fonte: Gavin, 2011.

-Despedaçamento do canto da bitola (*Shelling*): neste defeito, inicialmente, os trilhos exibem manchas escuras alongadas e irregularmente espaçadas no canto da bitola. Essas manchas são os primeiros sinais de desintegração do aço logo abaixo da superfície de rolamento que, em seguida, se manifesta por rebarba e trincas na face lateral e, finalmente, pelo despedaçamento do canto da bitola que pode atingir uma grande extensão do trilho. Neste estágio de evolução, o escoamento do metal pelo efeito do tráfego provoca um desnivelamento do boleto (VIDON, 2012).

Esse defeito é causado, principalmente, por elevadas cargas por roda agindo com alta frequência sobre uma pequena área de contato roda/trilho, gerando tensões de cisalhamento e

de escoamento que excedem a capacidade do aço do trilho para suportá-las. Geralmente, o *shelling* ocorre no lado superelevado onde o desgaste foi combatido pela lubrificação dos trilhos (VIDON, 2012). A Foto 16 mostra o despedaçamento do canto do trilho.

Foto 16: Despedaçamento do canto da Bitola



Fonte: Vidon, 2012.

-Depressão (*Squats* ou *dark spot*): como características, este defeito apresenta uma sombria e escura área que resulta do crescimento da trinca próximo ao plano horizontal, logo abaixo da superfície de rolamento. Isso significa que a superfície de rodagem acima da trinca é destacada do resto do trilho. Como consequência, o metal flui para a parte lateral, formando uma pequena depressão sobre a trinca onde ocorre a acumulação de produtos de corrosão e sujeira, gerando a “sombra”. Os *squats* podem ocorrer em qualquer região do trilho, mas a maioria está associada com corrugações, soldas e pequenos buracos periódicos na superfície de rodagem (VIDON, 2012). A depressão no trilho é apresentada na Foto 17.

Foto 17: Depressão



Fonte: Vidon, 2012.

-Patinagem (*wheel burn*): é uma avaria na superfície de rolamento causada pelas rodas dos trens, que por insuficiência eventual de atrito entre as rodas e o trilho, ficam rodando no mesmo lugar sem movimentar o trem. A fricção e o calor gerados nesses deslizamentos ocasionam uma escavação na superfície do trilho. Pode ocasionar a formação de trincas

transversais em volta da marca deixada pela patinagem e, com isso, o trilho adquirir uma trinca transversal interna, que pode progredir até uma fratura completa (GAVIN, 2011). A Foto 18 representa a patinagem nos trilhos.

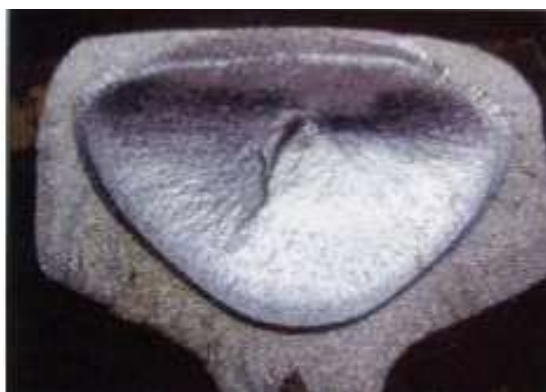
Foto 18: Patinagem



Fonte: Gavin, 2011.

-Cavidades (*Tache Ovals*): os defeitos do tipo *tache ovals*, para Grassie (1997), estão relacionados com um deficiente processo de soldagem. Desenvolvem, em função disso, cavidades de 10 a 15 milímetros longitudinais no boleto do trilho, causadas pela presença de hidrogênio, onde se evidenciam defeitos chamados *shatter cracks*, podendo ainda ocorrer em outras partes do trilho. A cavidade é apresentada na Foto 19.

Foto 19: Cavidade



Fonte: Grassie, 1997.

-Deformação Plástica do Boleto (*rail plastic flow*): o escoamento do aço do boleto é uma deformação plástica que altera o contorno dessa região, sem afetar a integridade do trilho. Essa irregularidade resulta da ação combinada de elevadas forças de compressão e de arrastos gerados pelo repetitivo contato dos aros das rodas sobre o boleto do trilho. Dessa

forma, o aço escorre para além da face externa do boleto, formando rebarbas ou pontas externas (GAVIN, 2011). A Foto 20 mostra a deformação plástica em um trilho.

Foto 20: Deformação plástica do Boleto



Fonte: Gavin, 2011.

-Esmagamento do Boleto ou *Crushed Head (CRH)*, se manifesta em um segmento do trilho, no qual o aço de que é feito apresenta uma queda na sua resistência mecânica, que o torna inadequado para suportar as elevadas cargas que continuamente passam sobre ele. Há um abaulamento e um alargamento do boleto no local e ao longo do defeito. Esta anomalia leva a uma queda na resistência mecânica do trilho, que o torna inadequado para suportar as elevadas cargas que continuamente passam sobre ele (GAVIN, 2011). O esmagamento é apresentado na Foto 21.

Foto 21: Esmagamento do Boleto



Fonte: Gavin, 2011.

-Sulco no Boleto ou *Long Groove (LNG)*, é uma anomalia de fabricação que se manifesta na superfície do boleto indicado por uma quase imperceptível mancha retilínea nas imediações de uma das suas faces laterais. É uma anomalia progressiva uma vez que a mancha evolui em trinca, também retilínea e pouco profunda, com 2 ou 3mm. Ocorre com

mais frequência nos trilhos com boleto não tratado termicamente, sendo muito comum a fratura do boleto na posição em que o sulco se instalou (GAVIN, 2011).

Os defeitos transversais são internos aos trilhos, que ao progredirem, podem provocar uma fratura transversal no trilho. Podem ser classificados em trinca transversal, trinca composta e trinca transversal reversa (SEMPREBONE, 2006).

A trinca transversal, mostrada na Foto 22, pode ser originada durante o processo de fabricação do trilho ou por uma separação longitudinal próxima da superfície de rolamento (SEMPREBONE, 2006).

Foto 22: Trinca transversal



Fonte: Semprebone, 2006.

A trinca composta inicia-se a partir de um defeito interno, com uma separação horizontal e depois muda para a direção vertical, formando uma fratura em dois planos, um dos quais atinge a superfície de rolamento (SEMPREBONE, 2006).

A trinca transversal reversa localiza-se na parte de baixo, geralmente em um entalhe na borda inferior de deformação ou próximo a ela. Em muitos casos, ocorre em linhas curvas com pouca lubrificação, em trilhos desgastados e que suportam elevadas cargas por eixo (SEMPREBONE, 2006).

Os desgastes do boleto são uma consequência natural do seu uso em serviço, sendo subdivididos em desgaste lateral, desgaste vertical anormal e desgaste ondulatório, já analisado (SEMPREBONE, 2006).

A busca de uma maior resistência ao desgaste do trilho, unida à conservação de outras características físicas, como a segurança contra rupturas, têm orientado a evolução do material dos trilhos (SEMPREBONE, 2006).

Quando há desgaste côncavo ou sulco nas rodas, o apoio passa a ocorrer no friso falso e as tensões de contato aumentam, ocorrência denominada regime de *stress* (MAGALHÃES, 2007).

O regime de desgaste, segundo Magalhães (2007) está vinculado a traços sinuosos, que resultam em muitos esforços laterais e amplos ângulos de ataque, resultando em um contato abrasivo do friso com o boleto, até ambos tornarem-se muito finos. Quando o traçado é predominantemente reto e o veículo se mantém centrado na via, gera-se o aprisionamento lateral das rodas, formando o regime de fadiga.

A evolução dos desgastes no trilho é típica, sendo que um trilho novo apresenta uma taxa acelerada de desgaste devido à existência em sua superfície de uma leve camada descaburada que é rapidamente eliminada. O material abaixo desta camada é mais rico em carbono e trabalha a frio, assim desenvolve uma película endurecida mais resistente ao desgaste. Embora ocorram mudanças na forma do perfil do boleto, um formato de equilíbrio é rapidamente atingido e, assim, o trilho sofre poucas variações ao longo do tempo (SEMPREBONE, 2006).

O desgaste lateral também conhecido por *Lateral Wear (LTW)* ou chanframento do trilho, é uma anomalia adquirida pelo contato dos frisos das rodas durante a inscrição dos veículos nas curvaturas do traçado. Atinge principalmente os trilhos externos das curvas de pequenos raios (inferiores a 600 metros), podendo, todavia, ocorrer em tangentes em virtude de um movimento anormal dos truques, denominado “*hunting*”. Esta anomalia, mostrada na Foto 23, é adquirida pelo contato dos frisos das rodas durante a inscrição dos veículos nas curvaturas do traçado, o que causa o enfraquecimento do trilho a tal ponto que possa vir a provocar uma fratura (GAVIN, 2011).

Foto 23: Desgaste lateral



Fonte: Gavin, 2011.

O desgaste vertical anormal ou *Abnormal Vertical Wear* (AVW), é resultante da ação do tráfego por um longo período aliado com a falta ou descuido da inspeção dos trilhos das tangentes onde as frenagens são freqüentes. A redução excessiva da altura dos trilhos pode levar a uma fratura. A identificação da anormalidade pode ser caracterizada pela excessiva largura (achatamento) assumida pelo boleto que se apresenta geralmente com escoamento do aço (GAVIN, 2011).

Os dois tipos de desgastes apresentados, o desgaste lateral e o desgaste vertical anormal, podem ser sensivelmente atenuados se o traçado for projetado com amplos raios de curvatura – acima de 1000 m e rampas suaves – abaixo de 0,5%. Além disso, pode-se diminuir este tipo de desgaste com a prática de uma controlada lubrificação da face da bitola dos trilhos superelevados, uma vez que a lubrificação em excesso estimula a formação de Shelling (GAVIN, 2011).

A fadiga é uma forma de falha que acomete estruturas sujeitas a um estado de tensões variável. A falha ocorre com um nível de tensões consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite escoamento para carga estática. O motivo final da falha por fadiga é a ruptura abrupta da seção que restou durante o processo de danificação da estrutura. O processo ocorre pela iniciação e propagação das trincas que causam ruptura após um determinado número de ciclos (GAVIN, 2011).

Falhas por fadiga são geralmente causadas pela ação simultânea de cargas cíclicas, tensões trativas e deformação plástica microscópica. Em geral, a superfície de fratura é perpendicular a uma tensão de tração aplicada (GAVIN, 2011).

Outros defeitos originados em serviço são as deformações nas pontas, desgastes por ação química e autotêmpera superficial, definidos por Brina (1996) a seguir:

As deformações nas pontas do trilho ocorrem devido aos choques e flexões nas juntas, quando os dormentes estão desnivelados. Podem gerar fadiga do metal e fraturas, caso a manutenção não seja feita para nivelar os dormentes.

O aço da alma e do patim do trilho pode sofrer desgaste por ação química quando são transportados mercadorias em uma via que forneçam esta condição, tais como sal e enxofre.

A autotêmpera superficial é um fenômeno que produz pequenas fissuras superficiais no trilho, as quais podem se propagar pelo seu interior. É provocada pela patinação das rodas dos trens que aquecem a camada superficial do metal e esta, ao se esfriar rapidamente em contato com o ar, cria uma têmpera superficial.

3.5 Vibrações

Uma vibração mecânica é o movimento oscilatório de uma partícula ou de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio. Este movimento oscilatório é geralmente provocado quando o sistema é deslocado da sua posição de equilíbrio estável devido, por exemplo, à atuação de forças exteriores, de deslocamentos da sua base ou de choques com outros corpos. As forças atuantes no corpo quando essa solicitação cessa têm a tendência de restaurar a configuração inicial, sendo denominadas forças de restituição. Quando o corpo atinge de novo a sua posição inicial a sua velocidade não será nula pelo que o movimento se prolongará no tempo como uma oscilação harmônica (RAO, 2010).

O estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças que lhes são associadas. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de produzir vibração. Deste modo, a maior parte das máquinas e estruturas está sujeita a certo grau de vibração e o seu projeto requer geralmente o exame do comportamento oscilatório (RAO, 2010).

Os sistemas oscilatórios podem ser divididos em duas classes, segundo Rao (2010): lineares e não-lineares. Para os sistemas lineares estão desenvolvidos métodos matemáticos para o seu estudo que, ao contrario dos não-lineares, são bem conhecidos e de fácil aplicação. De uma forma geral, existem duas classes de vibração: a livre e a forçada. A vibração livre acontece devido a ação de forças inerentes a seu sistema, que no caso corresponde a sua frequência natural de vibração. Se o sistema estiver submetido a uma força externa, geralmente repetitiva, a vibração resultante é chamada de forçada que se for de natureza oscilatória, o sistema será obrigado a vibrar na frequência dessa excitação, e se esta coincidir com uma das frequências naturais do sistema, ocorrerá o estado de ressonância, podendo causar, a partir daí, amplas e perigosas oscilações (RAO, 2010). Este efeito de ressonância pode ser o agente causador de terrível colapso em estruturas como de pontes, edifícios e asas de avião, daí torna-se importante o cálculo prévio das frequências naturais do sistema no estudo de vibração.

Caso nenhuma energia seja dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação, a vibração é conhecida por não amortecida. No entanto, se alguma energia for perdida pelo sistema dessa maneira, ocorre uma vibração amortecida (RAO, 2010).

A vibração em um determinado equipamento é codificada em sinal elétrico pelo sensor, que por sua vez transmite através de cabos condutores até o coletor/analizador. A partir daí o mesmo sinal elétrico é interpretado por um software que através de um programa

passa a apresentá-lo na forma de sinal no tempo ou espectro de frequência, tornando a análise das condições do equipamento bem mais fácil, que esquematiza a instrumentação para coleta e análise de dados (HANSEN, 2005).

A Figura 15 representa a sequência de coleta e análise de dados vibratórios.

Figura 15 - Coleta e análise de dados

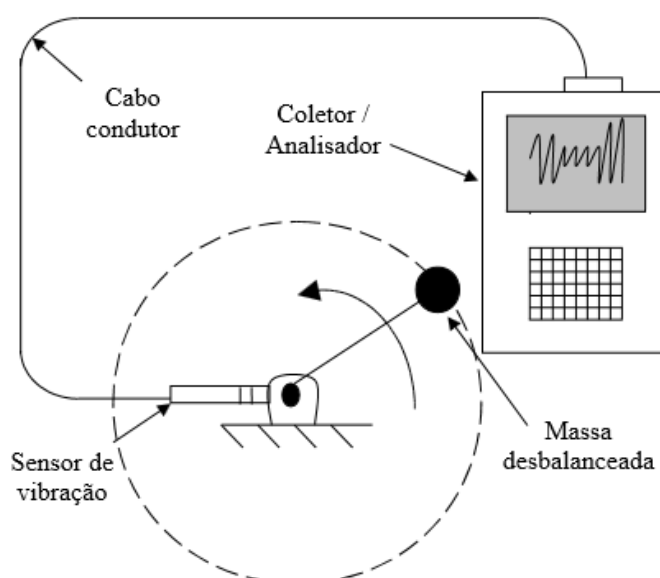


Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente existem vários programas para análise de vibração em manutenção preditiva, onde se podem definir quais os equipamentos a acompanhar e também os pontos de cada um que serão monitorados. Além do mais, estes programas podem fornecer vários tipos de relatórios de acompanhamento e análise. O filtro é o responsável por limitar as faixas de frequência de cada tipo de coleta de vibração que se pretenda trabalhar: deslocamento, velocidade ou aceleração (HANSEN, 2005).

A Figura 16 ilustra, esquematicamente, um sistema de coleta e análise de vibração.

Figura 16 - Diagrama esquemático para análise de vibração



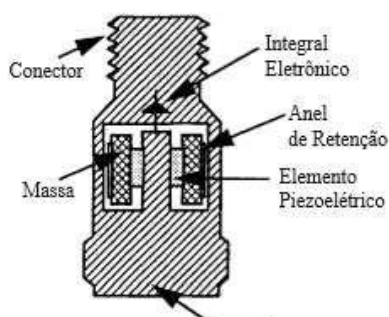
Fonte: Hansen, 2005

Os sensores de vibração são dispositivos que fazem a codificação de um sinal mecânico em um sinal elétrico representativo. Existem basicamente três tipos de sensores no mercado: de deslocamento, de velocidade e o acelerômetro (HANSEN, 2005).

O acelerômetro, quando fixado a uma superfície sujeita a vibração, produz em seus terminais de saída uma diferença de potencial elétrico que é proporcional à aceleração no qual está submetido, ou seja, seu princípio de funcionamento está na utilização de discos cerâmicos piezoelétricos, que por sua vez possuem a propriedade física de gerarem descargas elétricas quando solicitados a esforços (HANSEN, 2005).

A Figura 17 ilustra de forma esquemática um acelerômetro.

Figura 17 – Sensor de Aceleração



Fonte: IMI, 2013.

O trem apresenta um determinado nível de vibração devido a sua operação. Qualquer acréscimo nesse nível, como por exemplo, devido às irregularidades nos trilhos, pode gerar o agravamento de defeitos, como: desgaste do boleto do trilho, quebra de dormentes e o surgimento de trincas em alguns componentes do truque. Cada elemento apresenta uma forma característica de vibração, em aspecto e nível. Todavia, elementos iguais podem apresentar variações no comportamento dinâmico devido às variações de ajustes e defeitos (HANSEN, 2005).

Geralmente, em regime de funcionamento, o veículo está submetido a vibrações que ocorrem nas mais diversas frequências, originadas do seu funcionamento, dos seus componentes ou de fontes externas. Como todos esses sinais acontecem simultaneamente, torna-se muito difícil avaliá-los no domínio do tempo, pois teríamos diversas frequências e amplitudes sobrepostas. No entanto, se estes sinais forem avaliados no domínio da frequência (espectro de frequência), é possível realizar a separação exata de cada sinal, podendo assim conhecer e avaliar separadamente a intensidade da corrugação nos trilhos de cada curva analisada. Esta estratificação é normalmente feita por meio de tratamentos matemáticos,

sendo que os instrumentos que executam este trabalho utilizam automaticamente a Transformada Rápida de Fourier (FFT- Fast Fourier Transform).

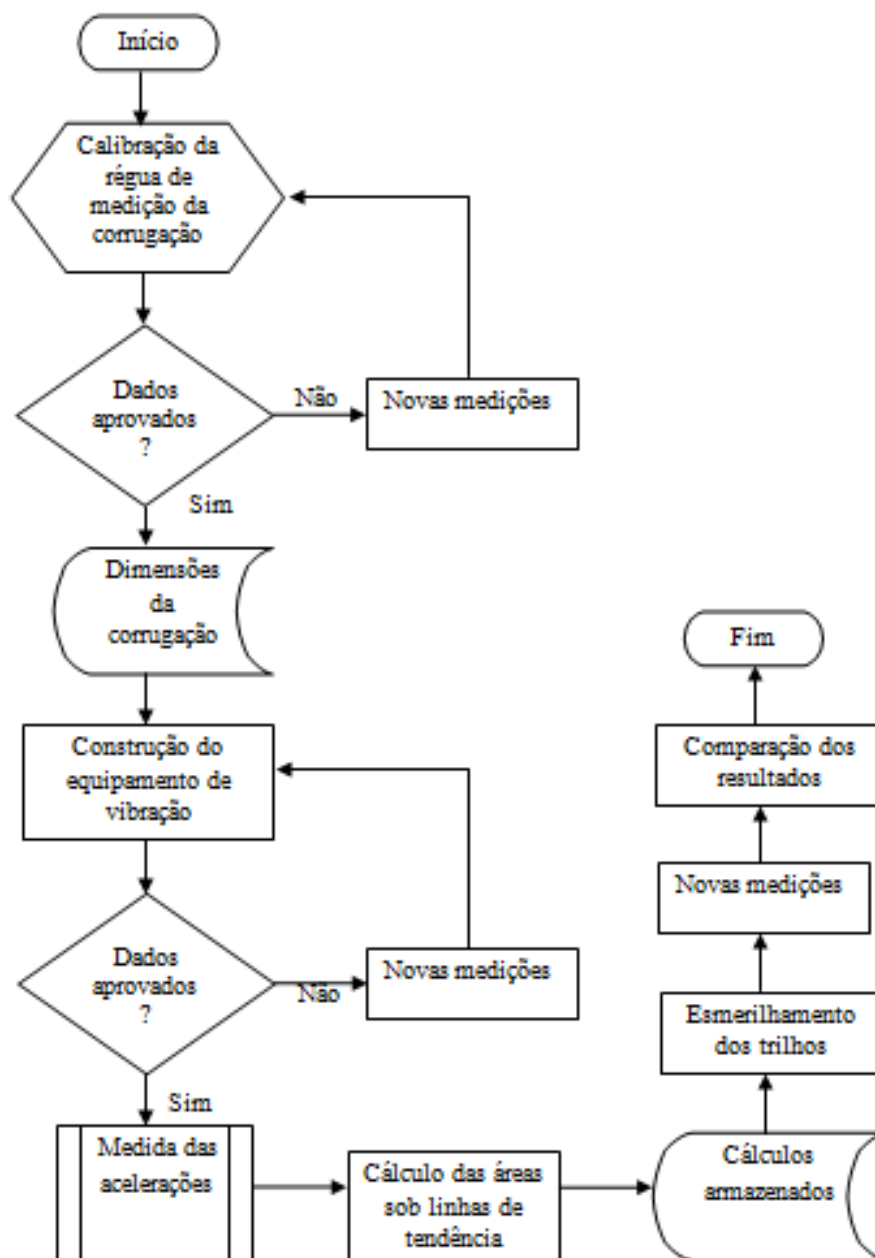
O aumento do nível de vibração está relacionado com alterações ocorridas em um ou mais elementos da máquina, influenciando também outros componentes por estarem interligados. Uma pequena vibração pode excitar frequências de ressonância de outras partes estruturais amplificando o efeito da vibração, que geralmente será percebido na estrutura e não diretamente na fonte de vibração (RAO, 2010).

A análise espectral revela as frequências nas quais os níveis de vibração variam significativamente. Estas frequências são correlacionadas com fenômenos mecânicos característicos, tais como alterações nas estruturas do trem e irregularidades nos trilhos, acarretando em aumento nos picos de frequência.

Existe uma correlação entre a frequência de ressonância teórica para o sistema veículo/via e o comprimento de onda das corrugações instaladas no trilho. O fenômeno de ressonância adiciona tensões dinâmicas que podem conduzir à deformação plástica ondulatória em forma de corrugação.

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo foi estabelecida uma metodologia para a realização da parte prática de coleta de dados em campo e sua posterior análise.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, através do uso da régua de medição de corrugação Rectiway, pode-se mensurar a amplitude e o comprimento ondulatório deste desgaste sobre os trilhos das curvas da via permanente que possuem raios inferiores a 600 metros e que serão o foco deste trabalho.

A Foto 24 mostra a régua de medição de corrugação.

Foto 24 - Régua de medição de corrugação Rectiway



Fonte: Fotografia do autor.

Após a calibração do instrumento, disponível para ser realizada pelo próprio aparelho, diferentes registros foram feitos e descartados em seguida para verificar a aferição do equipamento.

A Rectiway possui 100 captadores dimensionais fixados em uma régua de referência, de 1 metro de comprimento, sendo apoiada sobre o trilho por dois patins situados nas extremidades, onde também se localizam ímãs que fixam o equipamento na via. Os captadores dimensionais são capacitivos, de excelente precisão. Por princípio de funcionamento, o captador capacitivo fornece a medida média da superfície analisada.

Durante a medição, o circuito eletrônico converte a tensão de saída de cada captador em medida de distância mostrada na tela do equipamento, conforme a Foto 25.

Foto 25 – Tela do equipamento Rectiway



Fonte: Fotografia do autor.

Esse equipamento de metrologia possui uma gama de medição de ± 2 mm, uma precisão de ± 0.05 mm, resolução de ± 0.01 mm, com uma capacidade de arquivar 500 registros. Esse equipamento está em conformidade com a Norma EN-50121-4 (2000).

As medições foram realizadas na curva 21-B, entre as estações Vila Oeste e Cidade Industrial, trecho mostrado na Foto 26. Essa curva possui um raio de curvatura de 331,25 m e uma superelevação de 160 mm.

Foto 26 – Trecho da via entre a estação Vila Oeste e Cidade Industrial



Fonte: Fotografia do autor.

A Figura 18 mostra os principais parâmetros do trecho analisado.

Figura 18 – Parâmetros da via entre a estação Vila Oeste e Cidade Industrial



Fonte: CBTU, 2013.

Os registros foram feitos no trilho interno, onde o efeito da corrugação é mais acentuado, entre as estacas 99 e 102 a cada 10 metros de distância.

Após a aquisição dos dados, utiliza-se o software RectiPC para a transferência dos gráficos para o computador por meio do conector RS232. Esses gráficos se encontram no apêndice A deste estudo.

A partir de então e conhecendo-se o valor da velocidade do trem nas curvas estudadas, é possível estabelecer os limites de medição para a construção do equipamento específico a este propósito.

O trem usado neste estudo recebe a denominação de TUE (Trem Unidade Elétrico), da Série 900 Cobrasma. Foi utilizada a composição de número 14 para a coleta de dados, pois o truque no qual serão coletados os dados possui todas as quatro rodas com as mesmas condições, ou seja, com diâmetro de 927 mm, sem deformações ou defeitos inerentes do uso.

Neste trabalho o sensor piezoelétrico foi montado parafusado em um suporte fixado na caixa de rolamento do rodeiro. Essa técnica requer que as superfícies de contato sejam planas e lisas para seu adequado funcionamento. Ela é a mais recomendada para instalações permanentes com testes nas frequências características do sistema ferroviário. Se for instalado sobre superfícies curvas, rugosas e irregulares, o desalinhamento e a limitação da superfície de contato podem reduzir significativamente a faixa de frequência e amplitude de operação do sensor.

Características como localização, rugosidade da superfície, temperatura e portabilidade são críticas para serem levadas em consideração na montagem do equipamento. No entanto, o fator mais importante é o efeito que a técnica de montagem tem na faixa de operação com alta frequência do acelerômetro, sendo que a resposta de baixa frequência não é afetada por essa técnica.

Após a preparação da superfície de montagem, foi espalhada sobre ela uma fina película de lubrificante, que para o caso em estudo será utilizada graxa, para melhorar a transmissibilidade da vibração, representada na Foto 27.

Foto 27 – Montagem do acelerômetro



Fonte: Fotografia do autor.

A forma que o transdutor é fixado no ponto de medição altera sua frequência de ressonância e consequentemente o alcance da frequência. Uma prática conceituada é ter o limite superior da faixa de frequência de interesse a $1/3$ da faixa de frequência a qual tem como limite superior de ressonância do sensor.

Como se dispõe de um transdutor, a leitura foi feita do lado direito do truque motriz, por uma questão de logística para montagem do equipamento, especificamente no primeiro rodeiro, diretamente na caixa de rolamentos, conforme Foto 28.

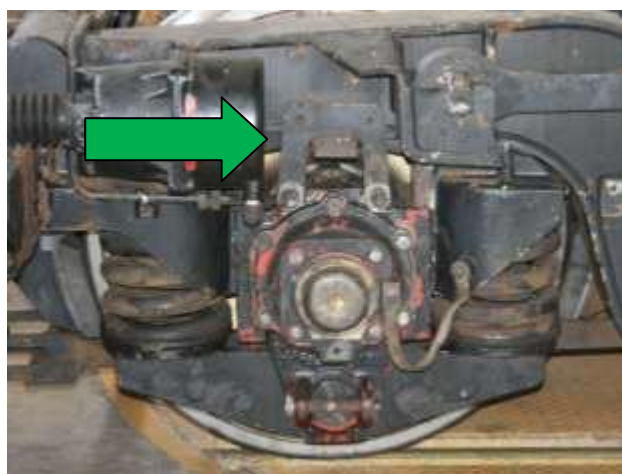
Foto 28 - Localização geral da instalação do equipamento no truque



Fonte: Fotografia do autor.

A seguir, na Foto 29 é mostrada mais especificamente a localização do estribo e onde o equipamento foi instalado no truque.

Foto 29 - Localização específica da instalação do equipamento no truque



Fonte: Fotografia do autor.

O estribo está fixado sobre a caixa de rolamentos, no extremo do rodeiro, sendo o local mais próximo do eixo e da roda. Assim, pretende-se obter os dados brutos da interação da via com a roda sem o efeito atenuante da suspensão primária do truque. A Foto 30 ilustra a posição do equipamento de coleta.

Foto 30 – Equipamento instalado no truque



Fonte: Fotografia do autor.

Quando o eixo vibra, onde está acoplado o sensor, a massa inercial exerce uma aceleração sobre o cristal piezoelétrico, gerando uma diferença de potencial proporcional à aceleração da vibração.

O transdutor transforma um sinal de vibração mecânica em um sinal elétrico que é transmitido ao instrumento de medição, através do cabo que liga o transdutor ao instrumento. O cabo para uso com acelerômetro, não deve ficar tracionado ou flexionado, para proteção mecânica e deverá ser blindado para evitar interferências eletromagnéticas externas. É importante que os procedimentos de medição sejam conservativos, isto é, as coletas de sinais devem ser feitas sempre no mesmo local e nas mesmas condições técnicas.

Para identificar as características da vibração provenientes da corrugação é necessário, inicialmente, determinar as vibrações normais sem a presença deste defeito, estabelecendo um grupo controle na execução das medições, para que possam ser eliminados e analisados somente os valores de vibração de interesse.

Para os pontos de medição, foi registrado o nível global, que representa a composição de várias fontes de vibração. Estes níveis avaliados devem permanecer dentro de faixas admissíveis. A partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração, é feita uma análise de frequência para identificação da origem do problema estudado.

O estabelecimento do intervalo entre as medições dependerá dos resultados das medições iniciais e poderá ser alterado ao longo do monitoramento, sendo inicialmente considerado um período mensal. Os diagnósticos para fins de manutenção são obtidos separando-se as harmônicas do sinal global e associando-as com os trilhos desgastados, para que se possa identificar o grau desses defeitos ondulatórios.

Inicialmente foi construído um protótipo do coletor de vibrações com o objetivo de testar a eficiência do processo concomitantemente aproveitar alguns equipamentos que CBTU possuía de outros projetos. Nesse protótipo o acelerômetro utilizado tem uma capacidade de 6 G, sendo os dados armazenados em uma memória de 8 megabytes, com uma precisão de ± 5 mG e uma resolução de ± 1 mG, com uma frequência de até 350Hz nos eixos x-y. Foi utilizada uma taxa de amostragem de 40 Hz e, a cada 25ms, ou seja, a cada 10 amostras registrava-se situação de maior valor de pico a pico. Todos os valores foram somente calculados baseados na folha de dados do circuito integrado antes de serem armazenados diretamente em G. A taxa de amostragem é função da velocidade do trem, variando o tempo de aquisição dos dados. As medidas realizadas com esse aparelho estão no apêndice B deste estudo.

No aparelho em que será apoiado o trabalho foi utilizado um acelerômetro que possui uma capacidade de ± 16 G, e os dados serão armazenados em uma memória de 64 megabytes, com uma precisão de ± 5 mG e uma resolução de ± 1 mG. A relação sinal/ruído é desprezível neste caso, pois o amplificador operacional separa o sinal colhido do ruído recebido na entrada diferencial.

O equipamento de coleta foi ligado ao gerador de pulsos que está conectado ao eixo do truque do trem, que emite 48 pulsos por volta da roda. O tacogerador registra vários eventos funcionais para análise, como a velocidade, e em caso de acidente, executam a função de vigilância automática do TUE.

Para as rodas usadas na coleta, com 927 mm de diâmetro, a frequência do tacogerador é de 4,22 Hz por km/h do trem. No entanto, o equipamento de coleta foi configurado para que a aquisição de dados fosse uma função da distância percorrida pela roda durante 1 pulso, ou seja, 60,672 mm. Para evitar um excesso de informações armazenadas no aparelho, ele foi programado para arquivar o maior valor da aceleração a cada 10 pulsos, ou seja, a cada 606,72 mm percorridos.

A calibração do aparelho ocorreu antes dos primeiros testes, e foi realizada no laboratório de vibrações mecânicas da PUC Minas. Utilizou-se um *shaker* e um acelerômetro uniaxial para a aferição do sistema de coleta, conforme a Foto 31 a seguir.

Foto 31 - Aferição do equipamento



Fonte: Fotografia do autor.

A partir de então, uma série de testes ocorreram na via permanente do metrô de Belo Horizonte, com um foco especial nos trechos onde foram colhidos os dados da corrugação.

As medições foram feitas na via 2, Vilarinho/Eldorado, sendo o equipamento ligado na Estação Minas Shopping e desligado na Estação Eldorado.

Após esse levantamento de dados, foi realizado o esmerilhamento da via com o intuito de remover a corrugação dos trilhos. Para esse processo, a CBTU contratou uma empresa, que possui um trem esmerilhador. A atividade aconteceu ao longo do mês de dezembro de 2015.

O efeito de esmerilhamento com blocos abrasivos é obtido pelo movimento oscilatório do conjunto, com uma carga vertical ajustada hidraulicamente e com o movimento contínuo da máquina para frente. A foto 32 representa a sequência de operações do processo.

Foto 32 - Sequência de operações do esmerilhamento



Fonte: CBTU, 2013

A máquina é equipada com dispositivos de retificação, o que possibilita o aplainamento dos trilhos na própria via, com a produção de cavacos. Os dispositivos de reperfilamento se apoiam nos trilhos mediante vários rolos, pressionados hidraulicamente sobre a via. Como os rolos estão dispostos em sentido longitudinal do trilho, o dispositivo segue as saliências e as depressões das ondulações no caso da superfície ser irregular, perfazendo um movimento longitudinal reto, não obstante as irregularidades. O trabalho sobre os trilhos é efetuado em várias passagens, podendo-se trabalhar em ambos os sentidos.

Após a realização desse processo, novas medidas utilizando o aparelho dedicado a coleta de vibrações foi realizada com o intuito de se comparar os dados obtidos antes e depois do esmerilhamento. Assim, pode-se determinar o momento apropriado de ocorrer à manutenção preditiva para a correção da via.

Com os dados coletados das acelerações, em m/s^2 , foram elaborados gráficos no EXCEL em função do número de pontos coletados pelo aparelho dedicado. Como o equipamento armazena o maior valor da aceleração a cada 10 pulsos, a distância entre dois pontos sucessivos é de 606,72 mm. Assim, foi possível conferir se o equipamento coletou todos os dados entre as estações, pois os valores das distâncias entre as mesmas foram fornecidos pela CBTU.

Para uma análise comparativa, foram selecionadas as medidas dos raios que representam faixas de valores que são frequentes na via do metrô de Belo Horizonte. Para cada valor de raio considerado, calculam-se as áreas a partir das equações das linhas de tendência polinomial de ordem 6, obtidas por meio de EXCEL, antes e após o esmerilhamento. Os cálculos das áreas foram efetuados no MAPLE, aplicando-se a integral definida, tendo como limites o intervalo do número de pontos coletados pelo aparelho. Os valores positivos da aceleração indica que o corpo foi deslocado para baixo e quando o corpo é acelerado para cima, os valores são negativos.

A seguir é apresentada a Tabela 1 para exemplificar os valores obtidos pelo aparelho dedicado. Os valores das acelerações, em m/s^2 , correspondem a trechos de elevados níveis de corrugação.

TABELA 1 – Valores das acelerações obtidos com o aparelho

Antes do esmerilhamento	Após o esmerilhamento
-6,86	-1,39
-6,58	-1,28
-4,18	-2,26
4,3	-1,78
3,26	-2,52
-4,14	-2,2
-3,81	-2,14
-3,18	-1,22
-4,82	-1,68
1,6	-2,61
-5,98	-2,5
-5,82	-1,8
-5,58	-2,3
-4,96	-2,2
-2,72	-1,09
-5,78	-2,17
-8,09	-2,23
-7,56	-1,96
-5,47	-1,46
2,99	-2,67
3,45	-3,28
-4,91	-3,56
-6,09	-1,78
2,88	-1,91
-4,29	-1,57
-5,1	-1,67
-4,82	-2,36
1,6	-2
-6,37	-1,07

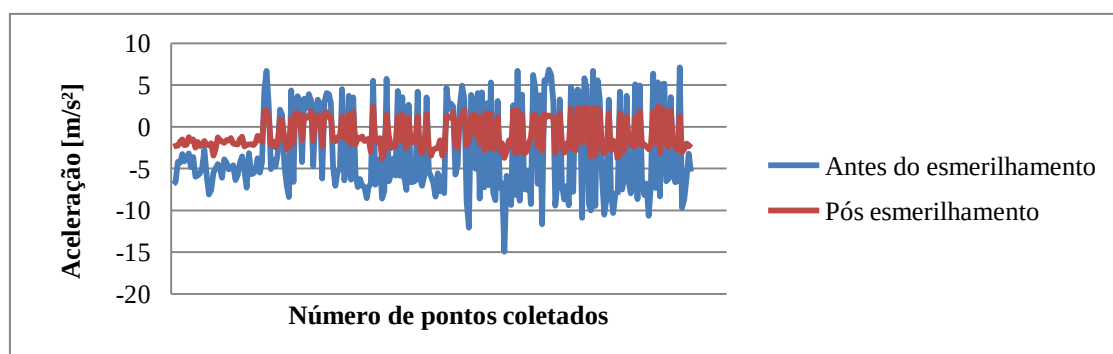
Fonte: Resultado da pesquisa.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As coletas realizadas antes e depois do esmerilhamento foram feitas com as mesmas condições, sendo usado o mesmo TUE, que percorreu a via com a mesma velocidade e com a mesma condição de tráfego. Estudos comprovaram a relação entre o esmerilhamento realizado sobre a via permanente e a diminuição do desgaste ondulatório nela presente. Com o equipamento dedicado apresentado neste estudo, pode-se mais uma vez constatar a eficiência desse processo de restauração do perfil do trilho.

Conforme outros artigos já constataram, a corrugação é mais acentuada em trechos da via que possuem os menores valores de raio como pode ser visualizado no Gráfico 1. Este trecho curvilíneo se estende por 248 metros, se localiza entre a estação Santa Efigênia e a estação Central e possui um raio de 154 metros.

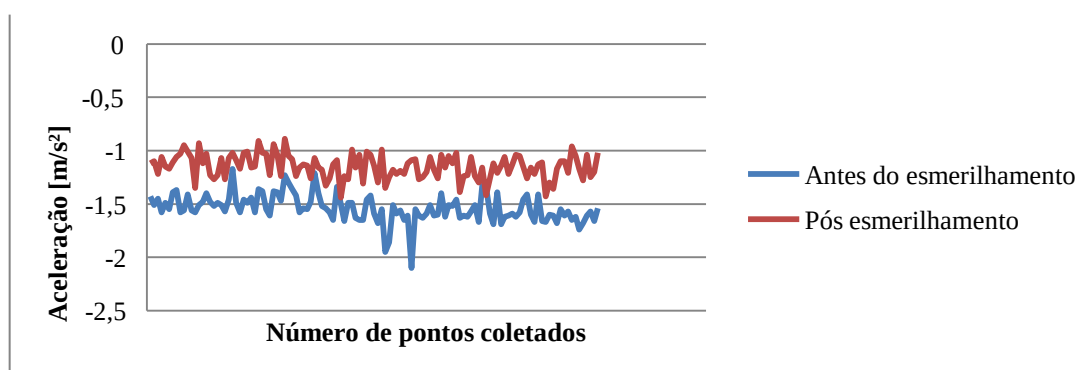
Gráfico 1 – Trecho da via de menor raio



Fonte: Resultado da pesquisa.

Em contrapartida, os níveis de corrugação são menores em trechos retilíneos e que possuam raios acima do valor de 1000 metros. O Gráfico 2 representa a região da via do metrô de Belo Horizonte, entre as estações Minas Shopping e José Cândido da Silveira, que possui o maior valor de raio (2498 metros) e se estende por 315 metros.

Gráfico 2 – Trecho da via de maior raio



Fonte: Resultado da pesquisa.

A primeira coleta de dados ocorreu antes do esmerilhamento e a segunda coleta logo após esse processo. Os valores obtidos da aceleração serviram de análise para correlacionar com o grau da corrugação da via.

É importante salientar também que o trem esmerilhador não realiza trabalho quando passa sobre um aparelho de mudança de via, e que este equipamento é responsável por causar um acentuado aumento nos valores das acelerações colhidas. Em virtude disso, existem trechos apresentados nos gráficos que são semelhantes, antes e depois do esmerilhamento, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Trecho que possui o Aparelho de Mudança de Via (AMV)

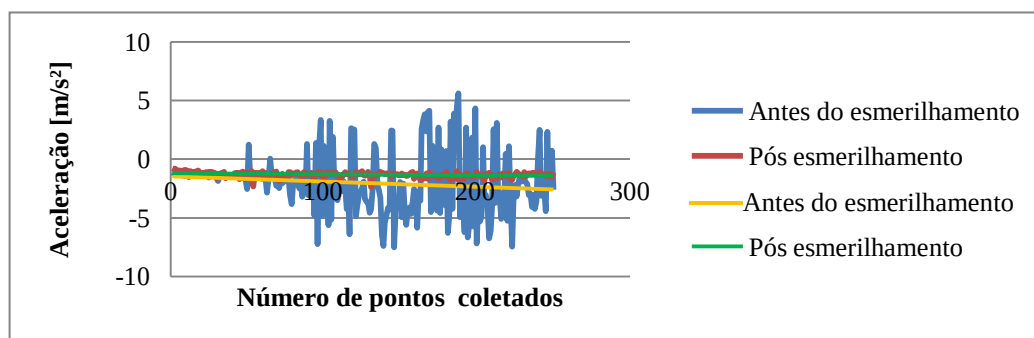


Fonte: Resultado da pesquisa.

Com os valores das acelerações coletados antes e após o processo do esmerilhamento, foi possível projetar as curvas no EXCEL. Para realizar uma análise comparativa, traçou-se uma linha de tendência sobre a qual os valores oscilam, para que se pudesse calcular a área sob cada curva como prova da eficiência dessa atividade.

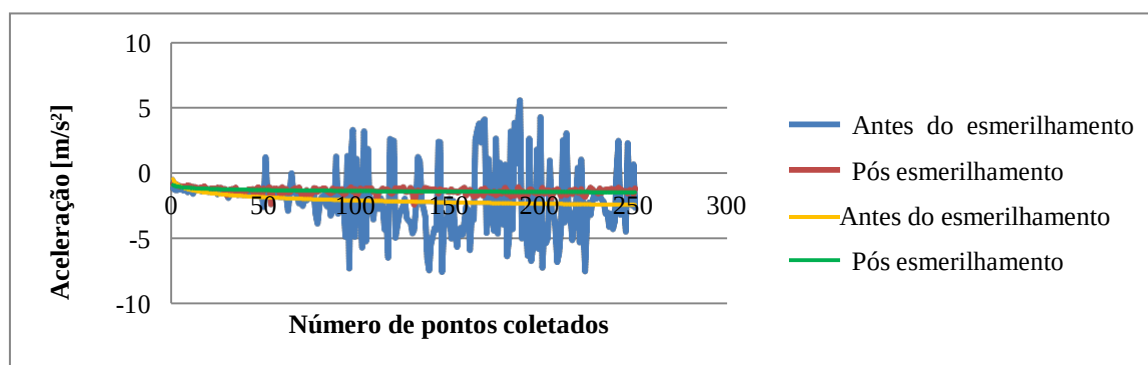
Em todos os gráficos que se seguem existe a seguinte conformidade dos dados com as cores: os valores das acelerações coletadas antes do esmerilhamento estão na cor azul e os valores após esse processo, em vermelho. As linhas de tendência antes do esmerilhamento em estão em alaranjado e após este processo, em verde. As equações das linhas de tendência seguem a última associação de cores.

A primeira opção de linha de tendência é a linear, que aplica uma linha reta de melhor ajuste para mostrar os conjuntos de dados que variam a uma taxa estável, não sendo o caso dos níveis de corrugação. A Gráfico 4 exemplifica essa linha para um trecho da via.

Gráfico 4 – Linha de Tendência Linear

Fonte: Resultado da pesquisa.

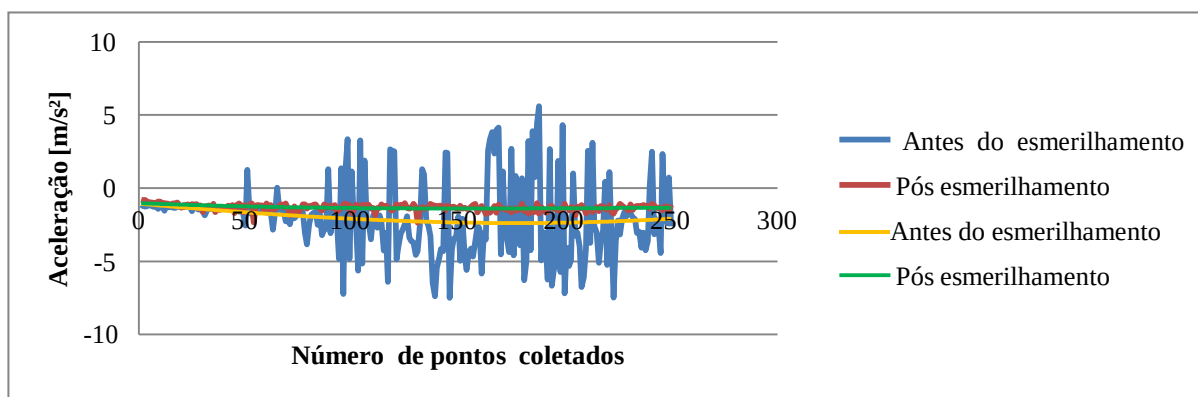
Outra opção é a linha de tendência logarítmica, que aplica uma linha curva de melhor ajuste para exibir os valores de dados que variam rapidamente antes do nivelamento, não sendo também o caso das vibrações da via. O Gráfico 5 ilustra esse tipo de linha para um trecho da via permanente.

Gráfico 5 – Linha de Tendência Logarítmica

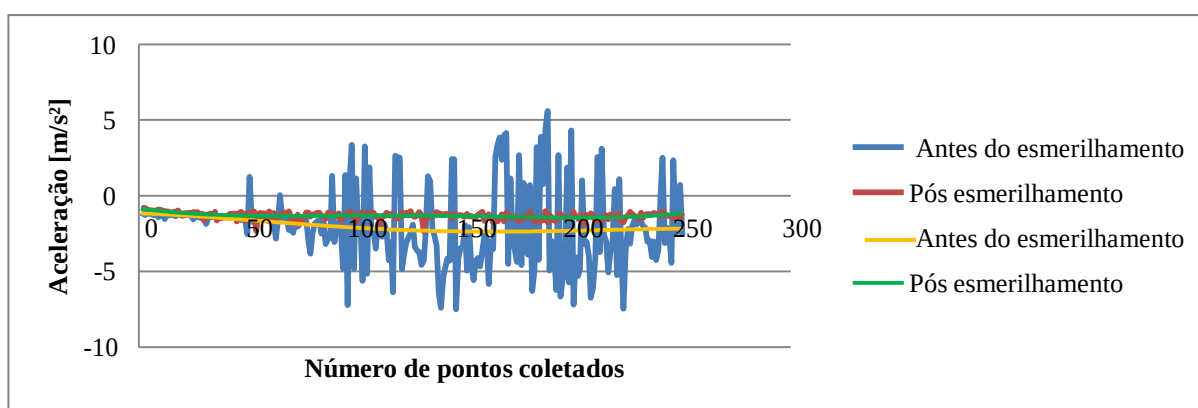
Fonte: Resultado da pesquisa.

A alternativa que melhor se adapta ao padrão dos dados coletados é a linha de tendência polinomial, que aplica uma linha curva para mostrar os valores de dados flutuantes. A ordem da polinomial varia de 2 a 6, o que determina o número de picos e vales que aparecem na curva sem determinado período.

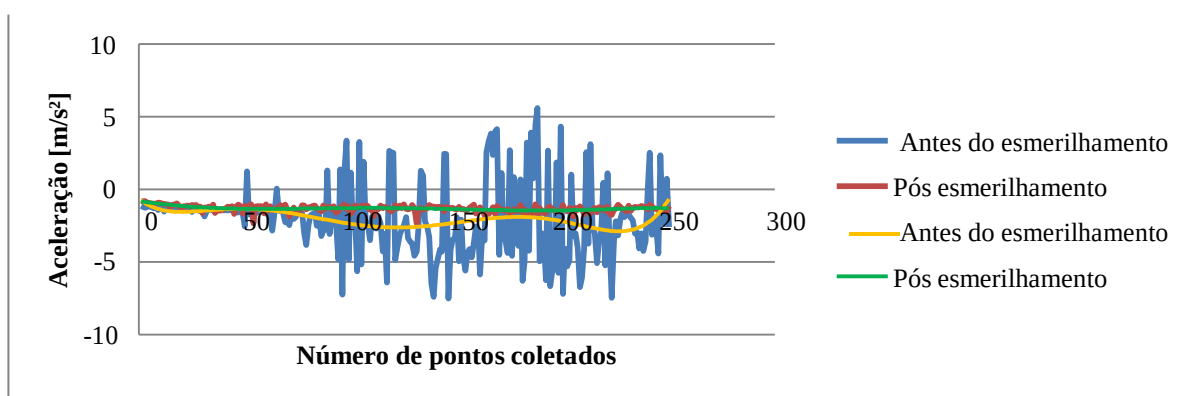
A seguir, são exibidas as linhas de tendência polinomial da ordem 4 até a 6 para que se possa comparar a mais adequada a análise em questão. Optou-se por não apresentar as linhas de tendência de ordem 2 e 3, em função desses resultados serem semelhantes aos obtidos na linha de tendência de ordem 4.

Gráfico 6 – Linha de Tendência Polinomial de Ordem 4

Fonte: Resultado da pesquisa.

Gráfico 7 – Linha de Tendência Polinomial de Ordem 5

Fonte: Resultado da pesquisa.

Gráfico 8 – Linha de Tendência Polinomial de Ordem 6

Fonte: Resultado da pesquisa.

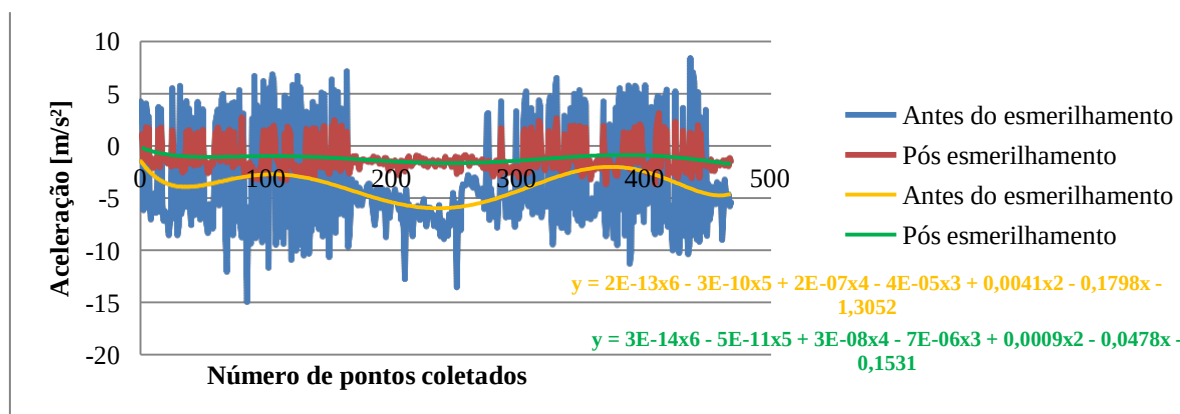
Percebe-se que a linha polinomial de ordem 6 é a mais adequada à análise, pois assim obtém-se uma maior quantidade de picos e vales, representando com maior precisão o comportamento de tendências dos dados armazenados.

Para uma análise comparativa, foram selecionadas as medidas dos raios que representam faixas de valores que são frequentes na via do metrô de Belo Horizonte. Para cada valor de raio considerado, calculam-se as áreas a partir das equações das linhas de tendência polinomial de ordem 6, obtidas por meio de EXCEL, antes e após o esmerilhamento. Os cálculos das áreas foram efetuados no MAPLE, aplicando-se a integral definida, equação 8, tendo como limites o intervalo do número de pontos coletados pelo aparelho. O valor negativo da área significa que a curva está na região negativa do plano cartesiano. Ao realizar a razão entre os valores calculados, o sinal não foi considerado.

$$\int_{n1}^{n2} f(x) dx \quad (8)$$

Para o valor de raio igual a 154 metros, elabora-se o Gráfico 9.

Gráfico 9 – Trecho da via de raio igual a 154 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{468} (2 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 - 3 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0041 \cdot x^2 - 0,1798 \cdot x - 1,3052) dx$$

$$= 1.532450513 \cdot 10^5$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

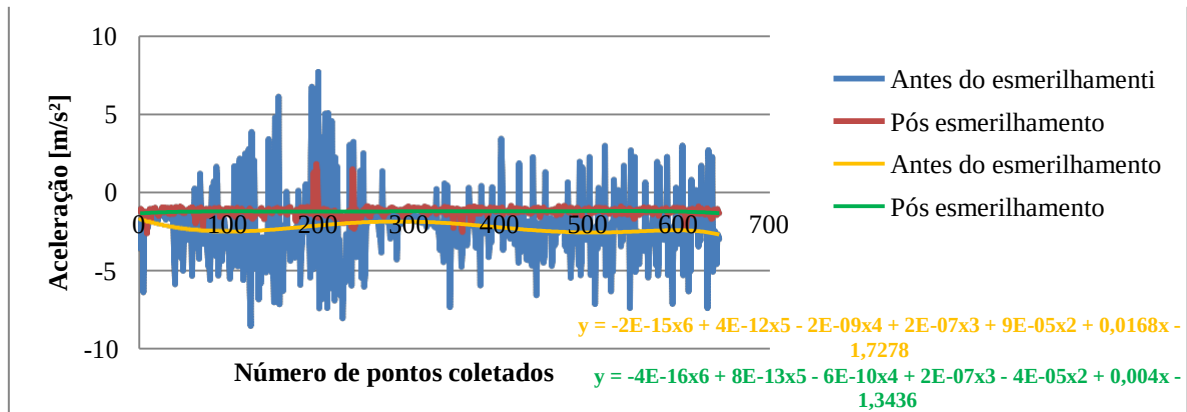
$$\int_0^{468} (2 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 - 5 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0009 \cdot x^2 - 0,0478 \cdot x - 0,1531) dx$$

$$= 2690,143846$$

A razão entre as áreas é: 56.96537437

Para o valor de raio igual a 244 metros, elabora-se o Gráfico 10.

Gráfico 10 – Trecho da via de raio igual a 244 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{645} (-2 \cdot 10^{-15} \cdot x^6 + 4 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,0168 \cdot x - 1,7278) dx$$

$$= 9163,779443$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

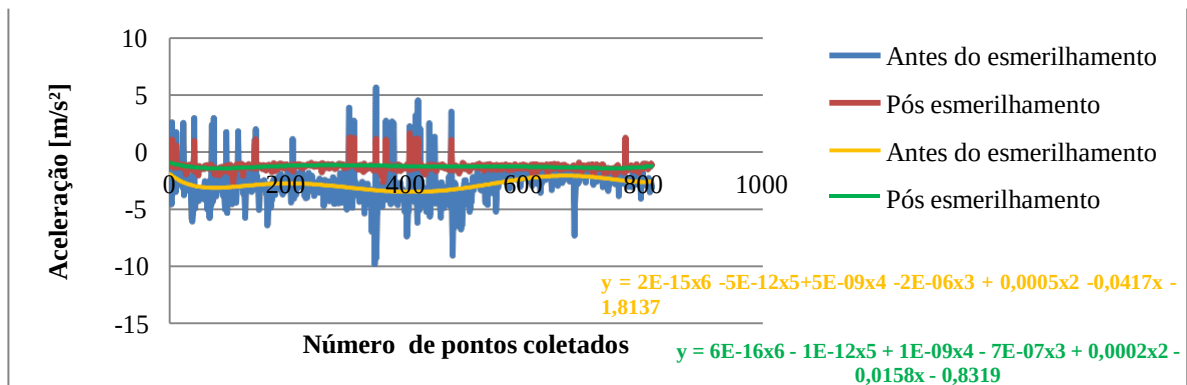
$$\int_0^{645} (-4 \cdot 10^{-16} \cdot x^6 + 8 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 6 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,004 \cdot x - 1,3436) dx$$

$$= -1407,993093$$

A razão entre as áreas é: 6.508398009

Para o valor de raio igual a 312 metros, elabora-se o Gráfico 11.

Gráfico 11 – Trecho da via de raio igual a 312 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{813} (2 \cdot 10^{-15} \cdot x^6 - 5 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0.0005 \cdot x^2 - 0.0417 \cdot x - 1.8137) dx$$

$$= 37487.99931$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

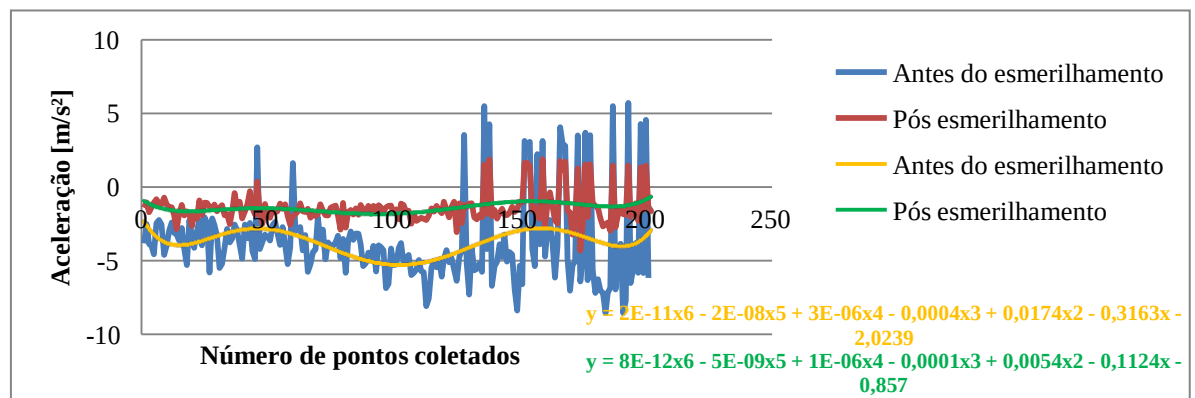
$$\int_0^{813} (6 \cdot 10^{-16} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 0.0002 \cdot x^2 - 0.0158 \cdot x - 0.8319) dx$$

$$= -3495.404443$$

A razão entre as áreas é: 10.72493897

Para o valor de raio igual a 461 metros, elabora-se o Gráfico 12.

Gráfico 12 – Trecho da via de raio igual a 461 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{202} (2 \cdot 10^{-11} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 0.0004 \cdot x^3 + 0.0174 \cdot x^2 - 0.3163 \cdot x - 2.0239) dx$$

$$= -1.110068367 \cdot 10^5$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

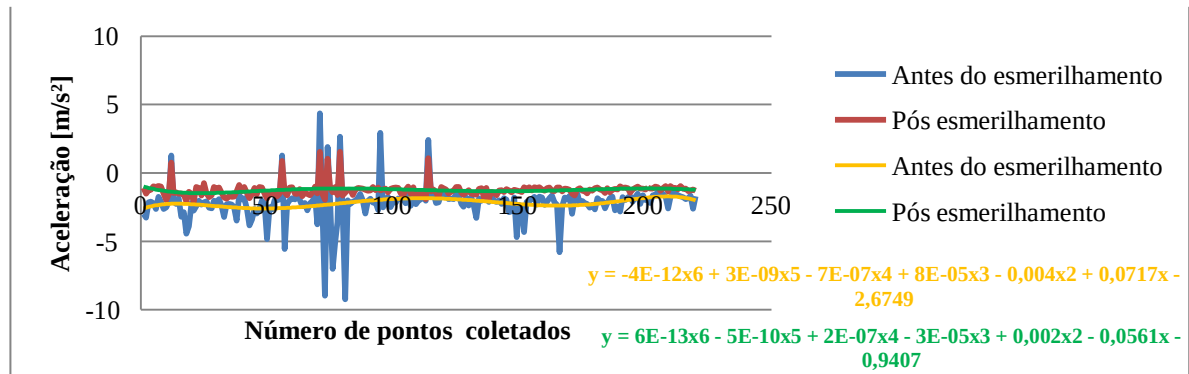
$$\int_0^{202} (8 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 - 5 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 0.0001 \cdot x^3 + 0.0054 \cdot x^2 - 0.1124 \cdot x - 0.857) dx$$

$$= -2920.081046$$

A razão entre as áreas é: 38.01498484

Para o valor de raio igual a 600 metros, elabora-se o Gráfico 13.

Gráfico 13 – Trecho da via de raio igual a 600 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{220} (-4 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,004 \cdot x^2 + 0,0717 \cdot x - 2,6749) dx$$

$$= 4086,159021$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

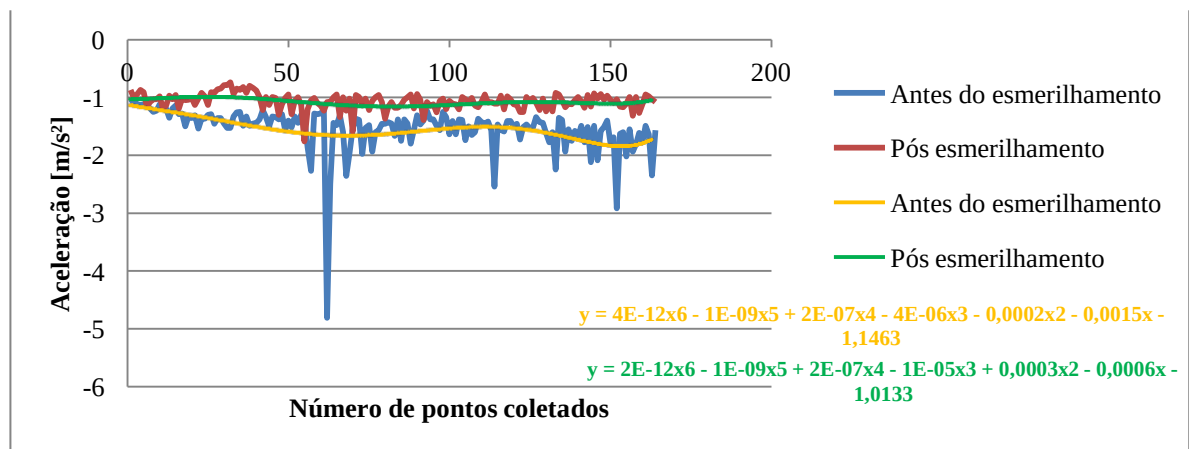
$$\int_0^{220} (6 \cdot 10^{-13} \cdot x^6 - 5 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,002 \cdot x^2 - 0,0561 \cdot x - 0,9407) dx$$

$$= 1269,116380$$

A razão entre as áreas é: 3.219688190

Para o valor de raio igual a 998 metros, elabora-se o Gráfico 14.

. Gráfico 14 – Trecho da via de raio igual a 998 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{164} (4 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 4 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0.0002 \cdot x^2 - 0.015 \cdot x - 1.1463) dx$$

$$= 1918.906371$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

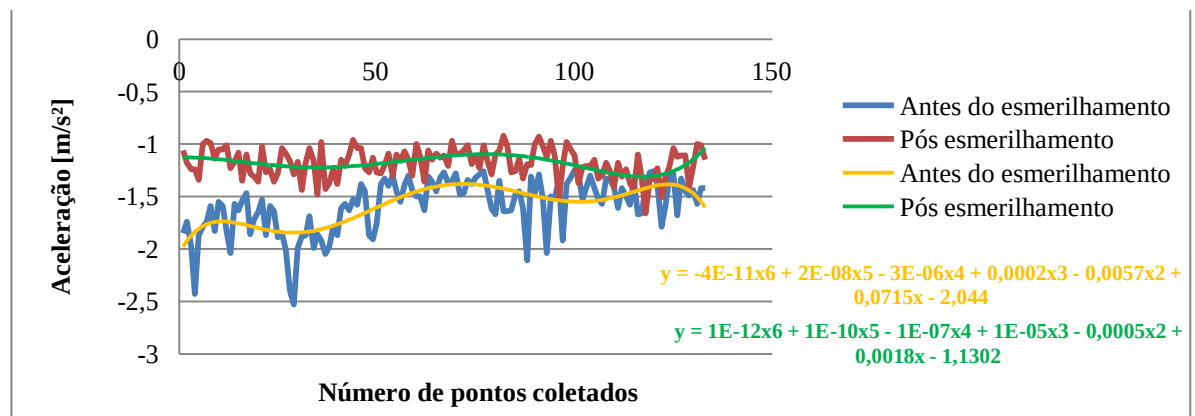
$$\int_0^{164} (2 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0.0003 \cdot x^2 - 0.0006 \cdot x - 1.0133) dx$$

$$= 872.7621025$$

A razão entre as áreas é: 2.198659137

Para o valor de raio igual a 1200 metros, elabora-se o Gráfico 15.

Gráfico 15 – Trecho da via de raio igual a 1200 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{133} (-4 \cdot 10^{-11} \cdot x^6 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0.0002 \cdot x^3 - 0.0057 \cdot x^2 + 0.0715 \cdot x - 2.044) dx$$

$$= 809.2228279$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

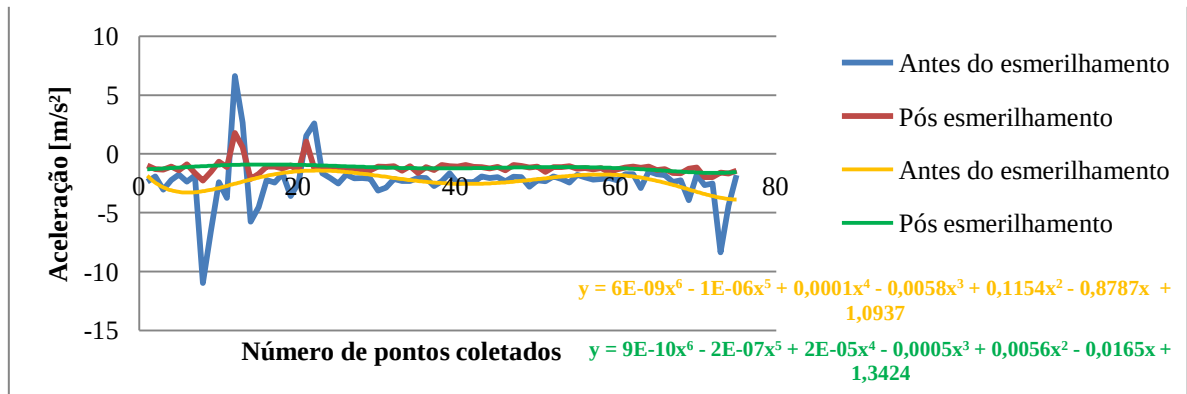
$$\int_0^{133} (-1 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot x^5 - 1 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0.0005 \cdot x^2 + 0.0018 \cdot x - 1.1302) dx$$

$$= -589.4815507$$

A razão entre as áreas é: 1.372770406

Para o valor de raio igual a 1800 metros, elabora-se o Gráfico 16.

Gráfico 16 – Trecho da via de raio igual a 1800 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{75} (6 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot x^5 + 0,0001 \cdot x^4 - 0,0058 \cdot x^3 + 0,1154 \cdot x^2 - 0,8787 \cdot x + 1,0937) dx$$

$$= -2800,769933$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

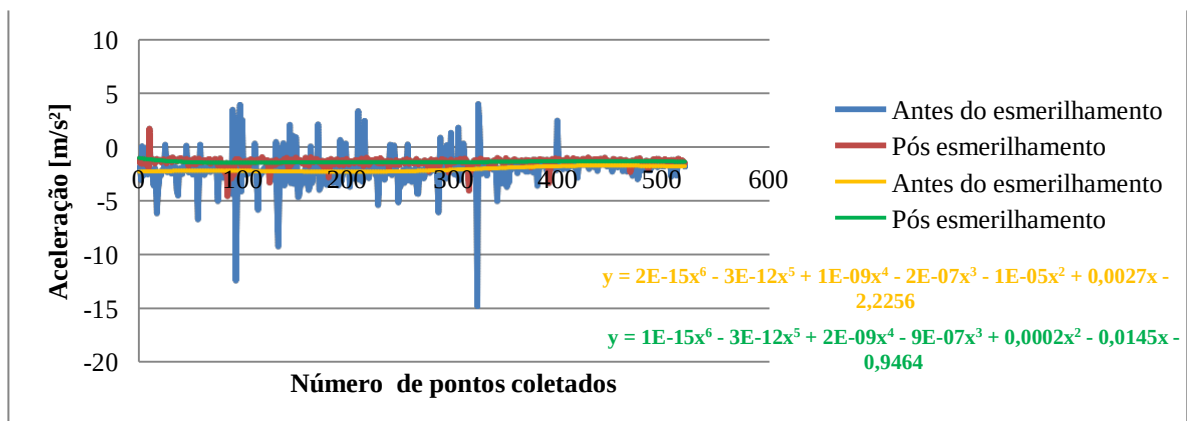
$$\int_0^{75} (9 \cdot 10^{-10} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 0,0005 \cdot x^3 + 0,0056 \cdot x^2 - 0,0165 \cdot x + 1,7724) dx$$

$$= 2194,737338$$

A razão entre as áreas é: 1.276129897

Para o valor de raio igual a 2498 metros, elabora-se o Gráfico 17.

Gráfico 17 – Trecho da via de raio igual a 2498 metros



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{519} (2 \cdot 10^{-15} \cdot x^6 - 3 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0.0027 \cdot x - 2.2256) dx$$

$$= -4227.722535$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{519} (1 \cdot 10^{-15} \cdot x^6 - 3 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 0.0002 \cdot x^2 - 0.0145 \cdot x - 0.9464) dx$$

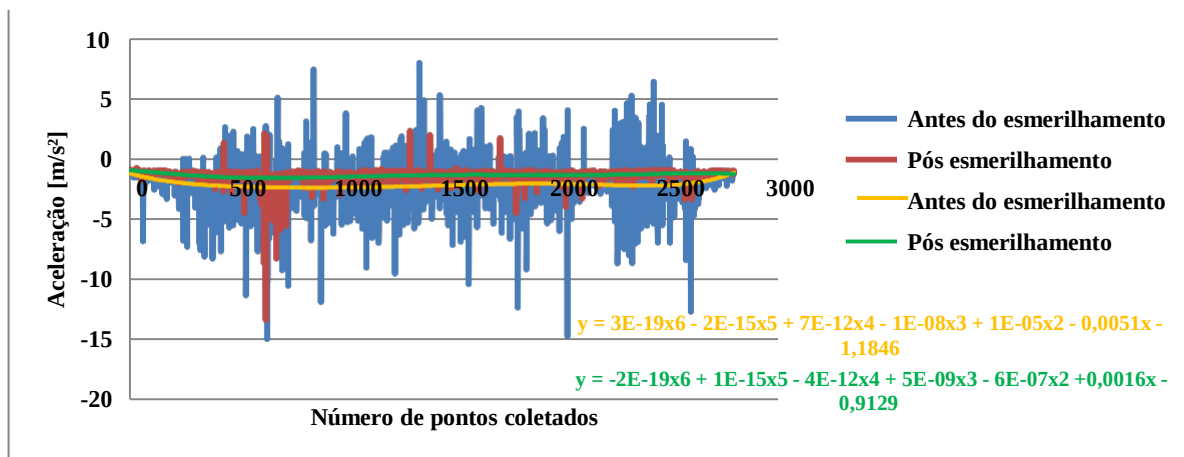
$$= -2709.394953$$

A razão entre as áreas é: 1.560393596

A seguir uma análise dos trechos entre as estações foi realizada para que se possa acompanhar a evolução da corrugação e determinar o momento adequado para a realização do esmerilhamento da via.

Entre as estações Minas Shopping e José Cândido da Silveira, os primeiros 1100 metros possuem raios de valores elevados, como 1721 metros e 2498 metros, no entanto nos últimos 400 metros existe um trecho curvilíneo de 404 metros de raio, o que acentua consideravelmente a corrugação. O Gráfico 18 exibe este percurso.

Gráfico 18 – Entre as estações Minas Shopping e José Cândido da Silveira



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2796} (3 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 7 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.0051 \cdot x - 1.1846) dx$$

$$= 34047.20507$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

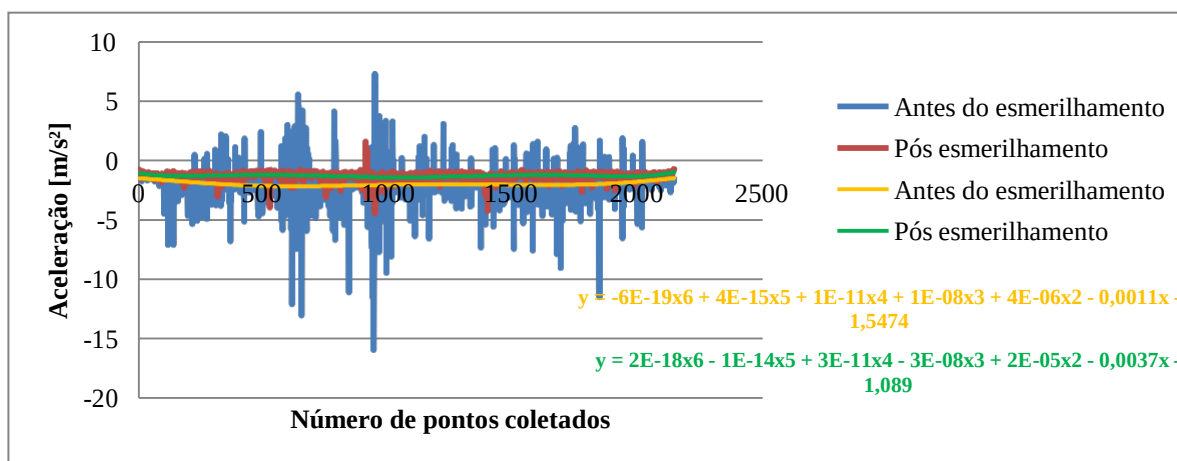
$$\int_0^{2796} (-2 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 + 1 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 4 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 6 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0016 \cdot x - 0.9129) dx$$

$$= -19516.65726$$

A razão entre as áreas é: 1.744520315

Entre as estações José Cândido da Silveira e Santa Inês, os primeiros 46 metros possuem níveis baixos de corrugação em função de ser um trecho curvo de raio de 2295 metros, aumentando em seguida pela presença de curvas de raios 254 metros e 312 metros. O Gráfico 19 mostra este trecho.

Gráfico 19 – Entre as estações José Cândido da Silveira e Santa Inês



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{21471} (-6 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 + 4 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 1 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 + 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0.0011 \cdot x - 1.5474) dx$$

$$= 1.989735735 \cdot 10^5$$

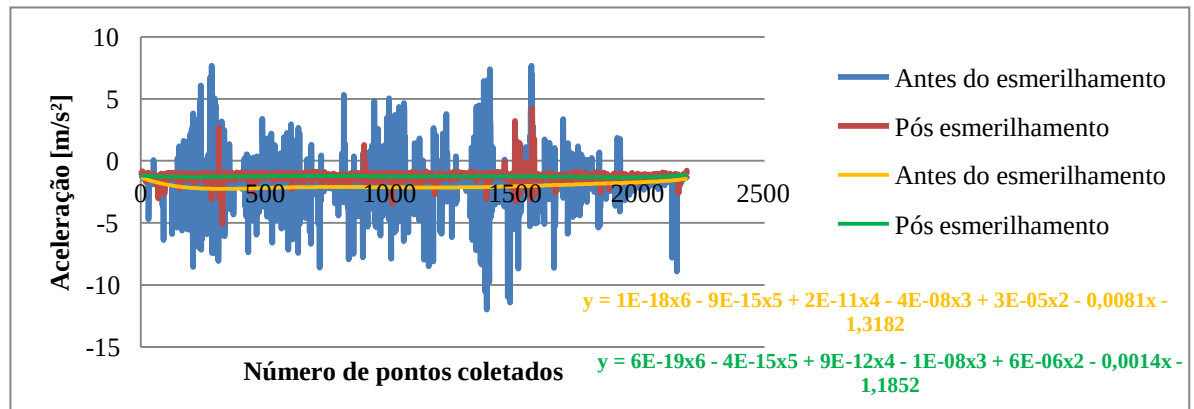
A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{21471} (2 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 3 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.0037 \cdot x - 1.089) dx$$

$$= 66310.63165$$

A razão entre as áreas é: 3.000628535

Entre as estações Santa Inês e Horto Florestal, os 384 metros iniciais correspondem a uma curva de 244 metros de raio, seguidas por curvas de 250 metros, 254 metros e 312 metros. O Gráfico 20 mostra este trecho.

Gráfico 20 – Entre as estações Santa Inês e Horto Florestal

Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2192} (1 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 - 9 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 4 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0081x - 1,3182) dx$$

$$= -77125,74198$$

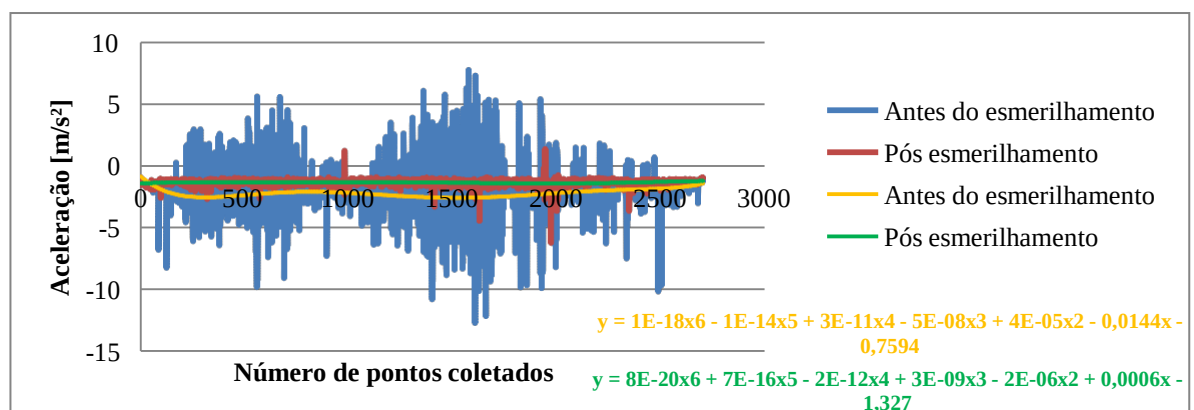
A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2192} (6 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 4 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 9 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,0014x - 1,1852) dx$$

$$= -4633,152055$$

A razão entre as áreas é: 16,64649488

Entre o Horto Florestal e a estação Santa Tereza, inicia-se com trecho retilíneo, seguida de uma curva de 312 metros de raio, outro trecho retilíneo, uma curva de 264 metros de raio, mais uma reta e uma curva de 368 metros de raio. O Gráfico 21 mostra este trecho.

Gráfico 21 – Entre as estações Horto Florestal e Santa Tereza

Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2704} (1 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 3 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 5 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.0144x - 0.7594) dx$$

$$= -92476.36872$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

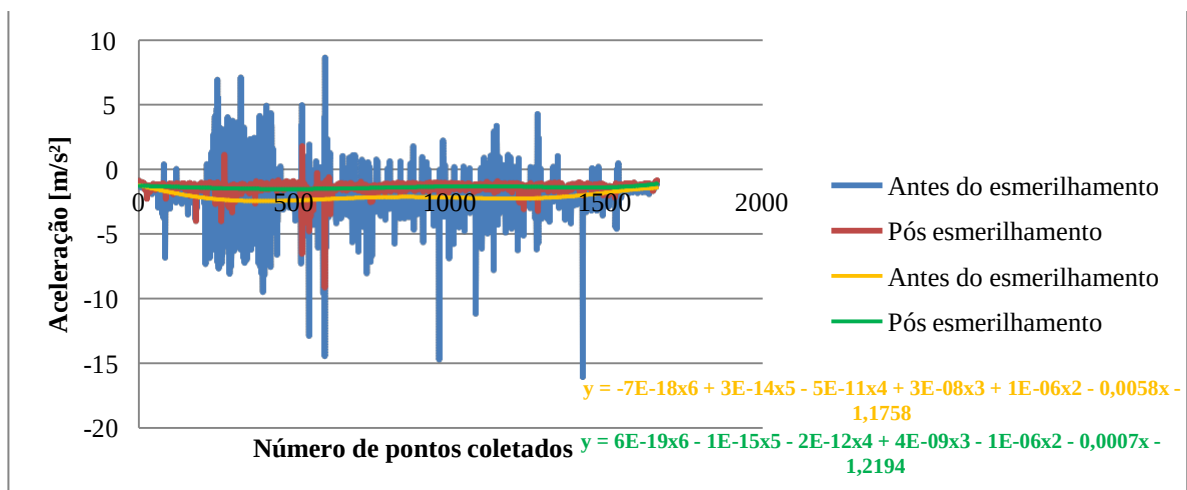
$$\int_0^{2704} (8 \cdot 10^{-20} \cdot x^6 - 7 \cdot 10^{-16} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0.0006x - 1.327) dx$$

$$= 25379.15809$$

A razão entre as áreas é: 3.643791823

No trecho entre Santa Tereza e Santa Efigênia, os 72 metros iniciais são de uma reta. Em seguida, uma curva de 229 metros de raio se estende por 255 metros da via, outro trecho retilíneo e mais uma curva de 671 metros de raio. Os últimos 270 metros deste percurso pertencem a uma curva de 1011 metros de raio. O Gráfico 22 exibe este percurso.

Gráfico 22 – Entre as estações Santa Tereza e Santa Efigênia



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{1662} (-7 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 + 3 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 - 5 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0.0058x - 1.1758) dx$$

$$= -7668.578134$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

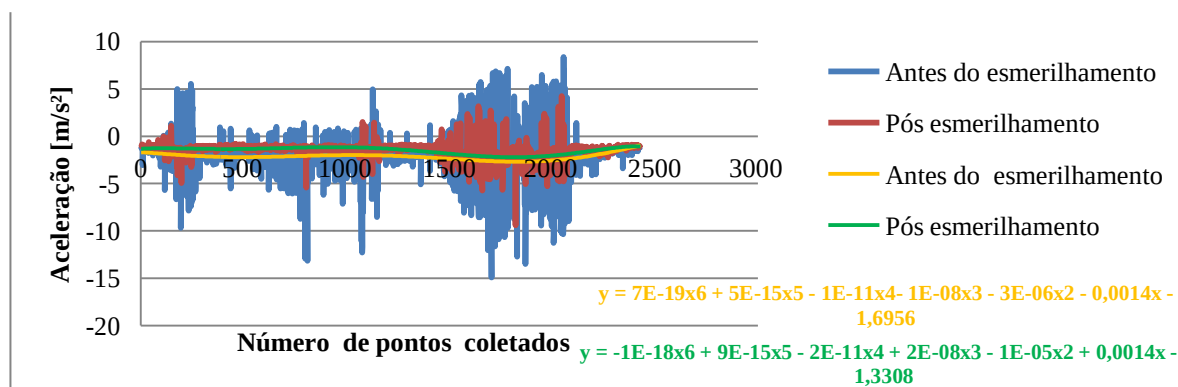
$$\int_0^{1662} (6 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 4 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0.0007x - 1.2194) dx$$

$$= -2476.375574$$

A razão entre as áreas é: 3.096694304

Entre a estação Santa Efigênia e Central, os primeiros 34 metros são de uma reta, seguida por uma curva de 200 metros de raio que se estende por 156 metros. Na sequência, aparecem duas curvas de raios de 311 e 461 metros, respectivamente. Valem ressaltar as duas curvas finais, sendo a primeira de 154 metros de raio e a segunda com 160 metros de raio. Este é o trecho mais crítico da via do metrô de Belo Horizonte e é apresentado no Gráfico 23.

Gráfico 23 – Entre as estações Santa Efigênia e Central



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2430} (7 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 + 5 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 1 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,0014x - 1,6956) dx$$

$$= -57622,48840$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

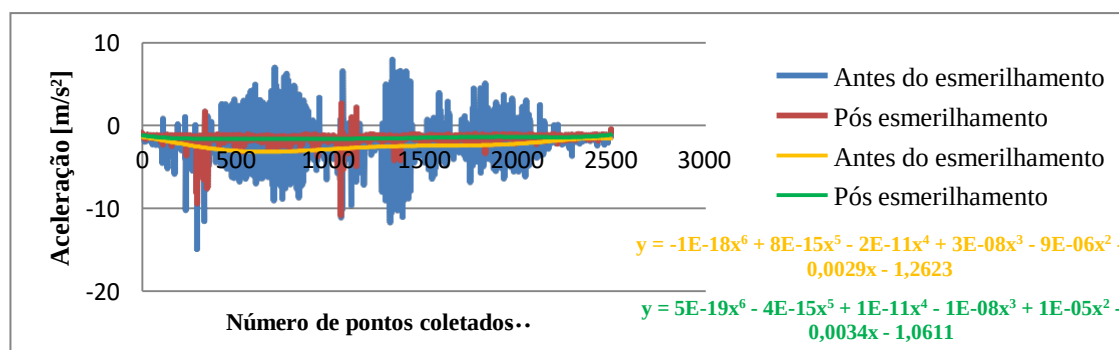
$$\int_0^{2430} (-1 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 + 9 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,0014x - 1,3308) dx$$

$$= 25856,73456$$

A razão entre as áreas é: 2.228529216

No trecho entre a estação Central e a Lagoinha, três curvas podem ser identificadas pelo gráfico. A primeira de raio 175 metros, seguida pela de raio de 254 metros e finalmente a que possui raio de 290 metros. O Gráfico 24 representa este trecho.

Gráfico 24 – Entre a estação Central e a estação Lagoinha



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2499} (-1 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 + 8 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0.0029x - 1.2623) dx$$

$$= 81418.52644$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

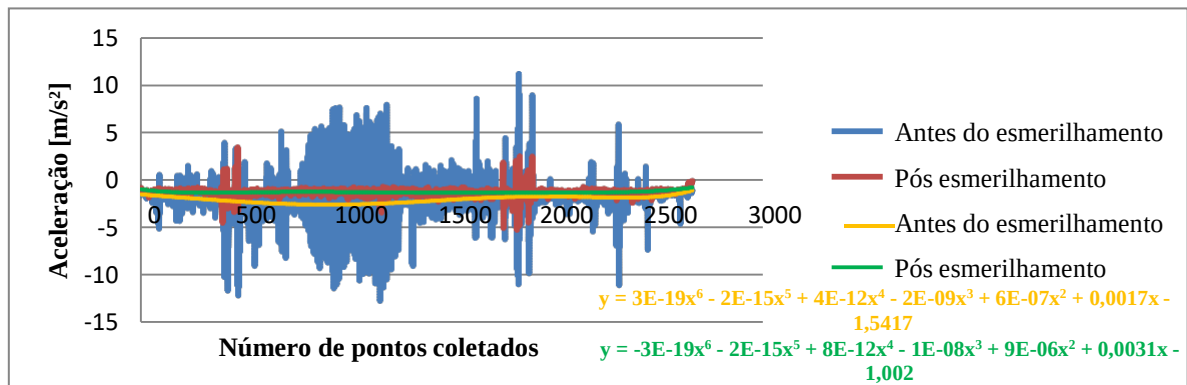
$$\int_0^{2499} (5 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 4 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 1 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.0034x - 1.0611) dx$$

$$= 17279.19555$$

A razão entre as áreas é: 4.711939639

Entre Lagoinha e Carlos Prates, a região onde a corrugação é mais acentuada pertence a uma curva de 316 metros de raio, que se estende por 580 metros deste trecho. O Gráfico 25 representa este trecho.

Gráfico 25 – Entre a estação Lagoinha e a estação Carlos Prates



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2660} (3 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 4 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 6 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0017x - 1.5417) dx$$

$$= 9486.688755$$

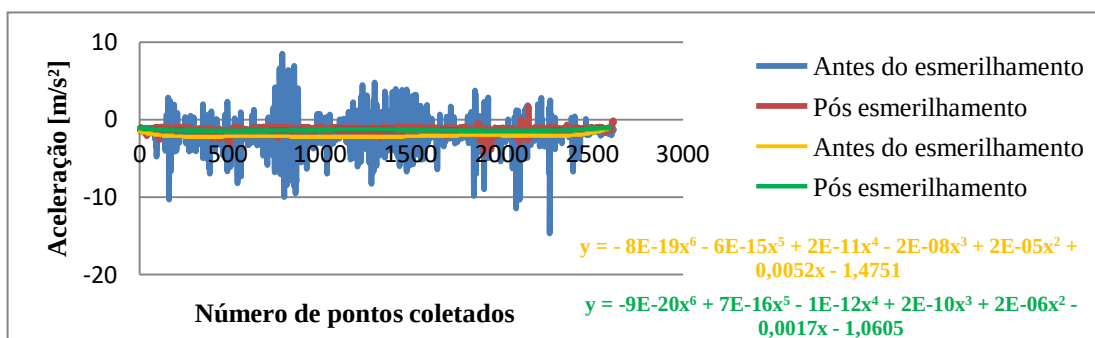
A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2660} (-3 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 8 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 9 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0.0031x - 1.002) dx$$

$$= -5782.786937$$

A razão entre as áreas é: 1.640504632

Entre Carlos Prates e Calafate, as regiões mais críticas pertencem a uma curva de 324 metros de raio (que se estende por 221 metros) e a outra curva de 296 metros de raio que abrange 424 metros deste percurso. O Gráfico 26 mostra este trecho.

Gráfico 26 – Entre a estação a Carlos Prates e a estação Calafate

Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2619} (-8 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 6 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,0052 \cdot x - 1,4751) dx$$

$$= -27935,43923$$

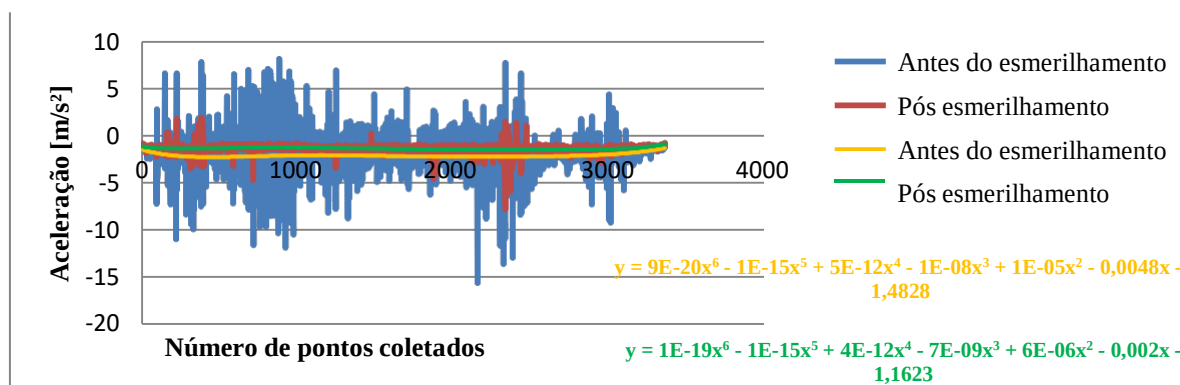
A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2619} (-9 \cdot 10^{-20} \cdot x^6 + 7 \cdot 10^{-16} \cdot x^5 - 1 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-10} \cdot x^3 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,0017 \cdot x - 1,0605) dx$$

$$= 7859,941143$$

A razão entre as áreas é: 3.554153743

Na sequência, entre Calafate e Gameleira, é importante salientar uma curva de raio igual a 316 metros e que se prolonga por 375 metros e outra curva de 324 metros de raio que se estende por 280 metros da via. Antes dos últimos 100 metros retilíneos, há uma curva de 600 metros de raio. O Gráfico 27 mostra este trecho.

Gráfico 27 – Entre a estação a Calafate e a estação Gameleira

Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{3370} (9 \cdot 10^{-20} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 5 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0048 \cdot x - 1,4828) dx$$

$$= 26868,04319$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

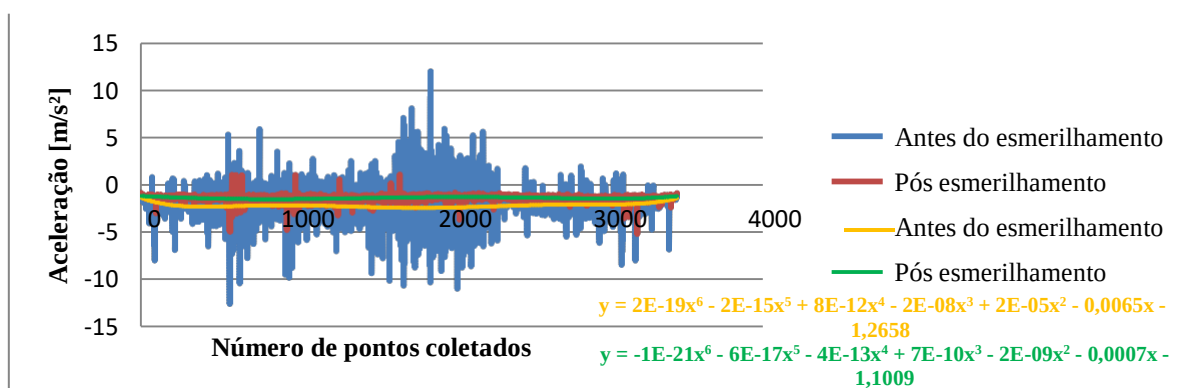
$$\int_0^{3370} (1 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 1 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 4 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 7 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0.002 \cdot x - 1.1623) dx$$

$$= 9671.851512$$

A razão entre as áreas é: 2.777962746

No trecho entre Gameleira e Vila Oeste, a região mais crítica se estende por 558 metros da via e possui raio de 304 metros. O Gráfico 28 representa este trecho.

Gráfico 28 – Entre a estação a Gameleira e a estação Vila Oeste



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{3443} (2 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 8 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.0065 \cdot x - 1.2658) dx$$

$$= -90690.60663$$

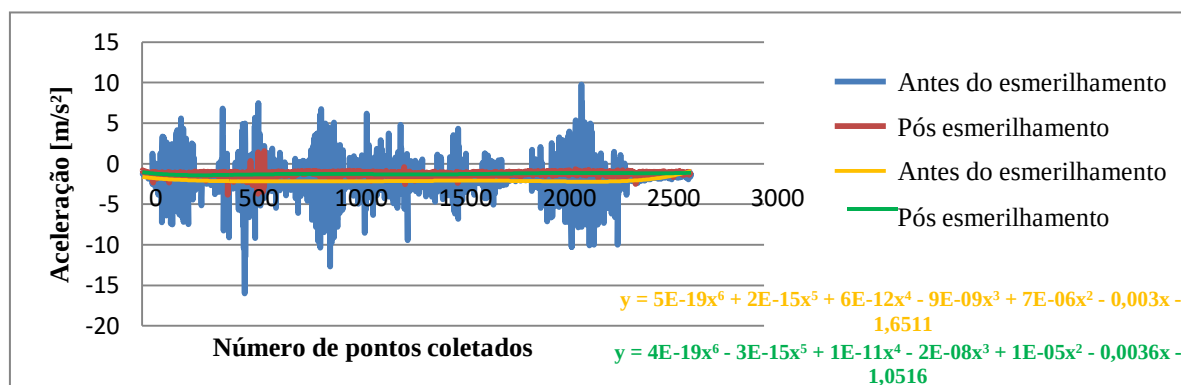
A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{3443} (-1 \cdot 10^{-21} \cdot x^6 - 6 \cdot 10^{-17} \cdot x^5 - 4 \cdot 10^{-13} \cdot x^4 + 7 \cdot 10^{-10} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 - 0.0007 \cdot x - 1.1009) dx$$

$$= -39558.05405$$

A razão entre as áreas é: 2.292595245

Entre Vila Oeste e Cidade Industrial, quatro curvas podem ser identificadas. Os 158 metros iniciais pertencem a uma curva de 316 metros de raio. Após um trecho retilíneo, uma curva de 324 metros de raio se estende por 245 metros. Posteriormente, uma curva de 331 metros de raio abrange 285 metros da via e outra curva de 324 metros de raio completam esse trecho. O Gráfico 29 representa este trecho.

Gráfico 29 – Entre a estação a Vila Oeste e a estação Cidade Industrial

Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2649} (5 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 + 2 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 6 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 9 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 7 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,003 \cdot x - 1,6511) dx$$

$$= 2.547672658 \cdot 10^5$$

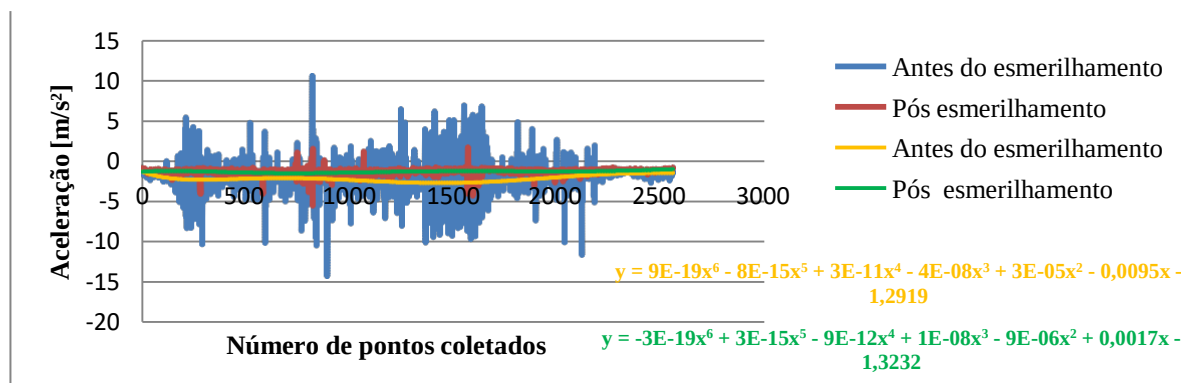
A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2649} (4 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 3 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 1 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0036 \cdot x - 1,0516) dx$$

$$= -59244,20629$$

A razão entre as áreas é: 4.300289965

Entre as estações Cidade Industrial e Eldorado, é importante salientar uma curva de 345 metros de raio na região inicial do gráfico e outra curva de 316 metros de raio. O Gráfico 30 representa este trecho.

Gráfico 30 – Entre a estação a Cidade Industrial e a estação Eldorado

Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{2559} (9 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 - 8 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 + 3 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 - 4 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0095 \cdot x - 1,2919) dx$$

$$= 80729,05964$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

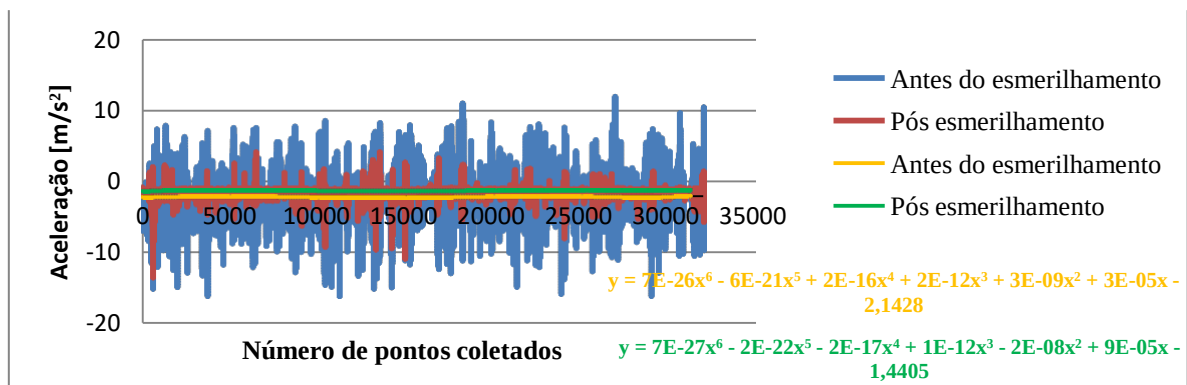
$$\int_0^{2559} (-3 \cdot 10^{-19} \cdot x^6 + 3 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 9 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 1 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 0.0017 \cdot x - 1.3232) dx$$

$$= -28801.41348$$

A razão entre as áreas é: 2.802954782

O Gráfico 31 representa o percurso total, entre a estação Minas Shopping e a estação Eldorado.

Gráfico 31 – Entre a estação a Minas Shopping e a estação Eldorado



Fonte: Resultado da pesquisa.

A área antes do esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{33718} (7 \cdot 10^{-26} \cdot x^6 - 6 \cdot 10^{-21} \cdot x^5 + 2 \cdot 10^{-16} \cdot x^4 + 2 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot x - 2.1428) dx$$

$$= 1.398682286 \cdot 10^6$$

A área após o esmerilhamento é calculada por:

$$\int_0^{33718} (7 \cdot 10^{-27} \cdot x^6 - 2 \cdot 10^{-22} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-17} \cdot x^4 + 1 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot x - 1.4405) dx$$

$$= -1.035969516 \cdot 10^5$$

A razão entre as áreas é: 13.50119154

Pode-se relacionar, após a análise do estudo comparativo, a diminuição das áreas das curvas com a queda das respostas vibracionais em virtude do esmerilhamento realizado sobre a via.

6 CONCLUSÃO

Segundo Martins (2010) existem três comprimentos de onda definidas para o desgaste ondulatório encontrado em trilhos: ondas curtas (de 6 a 25 cm); ondas médias (de 30 a 60 cm) e ondas longas (acima de 60 cm). Após a análise dos dados que se obteve com a régua de medição Rectiway, pode-se classificar a corrugação encontrada no trecho da via como sendo de ondas curtas.

Em curvas, onde o efeito da corrugação é mais acentuado, percebe-se pelos gráficos de resposta vibracional um aumento da amplitude da oscilação, sendo observado um valor médio de 0.1 mm de pico a pico.

Tendo em vista os aspectos abordados nesse estudo, conclui-se que a corrugação é uma consequência física direta do contato roda/trilho, no entanto os níveis de vibração são maiores em percursos que possuem os menores valores raio, e as acelerações colhidas pelo equipamento foram menores em trechos de menos curvilíneos.

As variáveis que podem ser discutidas que influenciam nas causas do aparecimento dos desgastes ondulatórios da superfície do trilho são a dinâmica do trem sobre a via, a velocidade da composição ferroviária e a operacionalidade do trem pelo maquinista.

Quanto à dinâmica, a corrugação, ao deformar o perfil do trilho, provoca o aparecimento de pontos de pressão unitária elevada, onde se iniciam defeitos no nível do plano de rolamento, tais como: aplanamento do boleto do trilho, rebarbas, escamação, esmagamentos e fissuras transversais. As deformações, provocadas pelo desgaste ondulatório, amplificam todas as solicitações à estrutura do trilho, particularmente nos locais em curva.

Analisando sob a perspectiva da velocidade, em trechos de maiores raios aplicam-se os maiores esforços de acelerações e frenagens, provocando variação dos esforços sobre a via permanente (que é uma função da velocidade angular da roda), o que produz pequenos escorregamentos instantâneos, que determinarão o aparecimento do desgaste ondulatório dos trilhos. Para ilustrar, no trecho da via de maior raio (2498 metros) a velocidade média do TUE foi de 80 km/h. No entanto no percurso de menor raio (154 metros) a velocidade média foi de 40 km/h, ratificando a importância da dinâmica do trem sobre a via, conforme já mencionado.

A operacionalidade do trem (que pode agravar o desgaste dos trilhos, por exemplo) envolve muitas variáveis, desde o bem estar do maquinista até falha que ele possa cometer, não sendo analisado neste estudo.

Pode concluir também que o esmerilhamento retifica o plano de rolamento e reperfila o perfil transversal do trilho, ao remover a corrugação em uma fase em que se evita

consequências danosas que este possa provocar. Isso foi observado ao se calcular às áreas sob as curvas antes e depois de ocorrido o processo. No trecho da via de raio de 1200 metros, área reduziu em torno de 2 vezes, no percurso de raio de 600 metros, aproximadamente 3 vezes e na região curvilínea de raio de 312 metros, a área diminuiu em torno de 10 vezes. A diminuição da área implica que houve uma redução dos níveis de vibrações coletados.

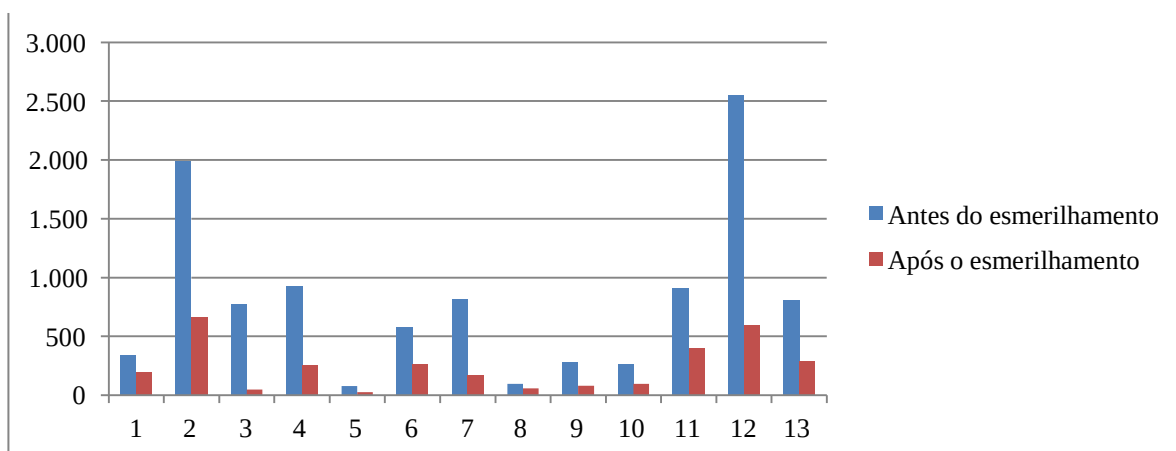
Portanto, as consequências do não controle do desgaste ondulatório surgem seguindo uma progressão logarítmica e levarão, no seu estado final, a danos irreversíveis na infraestrutura e também no material rodante, obrigando a dispendiosos investimentos de reparação/substituição.

A equipe de manutenção da via permanente deverá considerar a corrugação como um fenômeno inerente a existência deste meio de transporte, devendo o seu controle ser parte integrada das operações de manutenção da via.

Em resumo, o desgaste ondulatório amplia a manutenção requerida na via e nos veículos, aumenta a resistência à tração, submete os trilhos a vibrações, reduzindo o conforto nas viagens, além de provocar uma maior poluição sonora.

Realizando medições periódicas com o equipamento, pode-se acompanhar a evolução dos níveis de corrugação nos trilhos em virtude do aumento dos valores das áreas das curvas sob as linhas de tendência. Desta forma, pode-se programar a manutenção na via para eliminação da corrugação. O Gráfico 32 compara os valores obtidos antes e após o esmerilhamento na via. Os números de 1 a 13, no eixo horizontal, correspondem à sequência entre as estações Minas Shopping e Eldorado. Os valores do eixo vertical equivalem aos cálculos realizados das áreas sob as curvas apresentados na seção anterior.

Gráfico 32 – Comparação dos resultados



Fonte: Resultado da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7640: defeitos de trilhos utilizados para via férrea**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7650: Trilho**. Rio de Janeiro, 2014.
- BARAT, Josef. **A evolução dos transportes no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1978. p.385-390.
- BARBOSA, Roberto Spinola. **Aplicação de sistemas multicorpos na dinâmica de veículos guiados**. 1999. 296f. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo, 1999.
- BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de ferro: via permanente**. 5. ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro: S.A, 1996. p.1-182.
- CANNON, D.. Gets to grips with rail fatigue. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, v.39, n.12, p.49-50, June 1995.
- COIMBRA, Marcelo Vale. **A manutenção na via permanente ferroviária**. 2006. 151f. Dissertação (Mestrado)-Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transporte, Rio de Janeiro, 2006.
- Companhia Brasileira de Trens Urbanos, CBTU. **As operadoras de transporte urbano de passageiros no Brasil**. Material Técnico. Belo Horizonte: CBTU, 2013. p.32-89.
- DUKKIPATI, Rao. **Vehicle dynamics**. 3.ed. Flórida: CRV Press, 2000. p.74-120.
- DUTRA, Fernando. **Superestrutura ferroviária: trilhos**. 2012. 255f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ferroviária, Porto Alegre, 2012.
- FRÝBA, Ladislav. Estimation of fatigue life of way bridges under traffic loads. **Journal os Sound and Vibration**. Moscow, v.70, n.4, p.527-541, June 1996.
- GAVIN, Lower. **Engenharia da via permanente: manual de defeitos**. Companhia Vale do Rio Doce. Rio de Janeiro: S.A, 2011. p.102-189.
- GRASSIE, Stuart. Rail corrugation: advances in measurement understanding and treatment. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, v. 258, n. 7, p. 1224-1234, June 2005.
- GRASSIE, Stuart. Fatigue failure is often the hidden hazard. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, v.155, p. 29-30, Feb. 1997.
- HANSEN, Leif. **Aquisição de sinais vibratórios**. 3.ed.São Paulo: Moderna, 2005. p.43-98.

IMI- Manual de operação de acelerômetros piezoelétricos. 8.ed. New York: PCB, 2013. p.1-12.

JEONG, David. Progress in rail integrity research. **Federal Railroad Administration**. Cambridge, v.11, p.5-37, Aug. 1998.

KLEIN, L. B.. **Estudo de tensões em trilhos ferroviários**. 1995. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 1995.

KNUTTON, M. Measure, predict, prevent. **Internacional Railway Journal and Rapid Transit Review**. New York, v.189, p. 15-20, Aug. 2004.

KORPANEC, I.; TOWPIC, K. **Investigación ore sobre mantenimiento de infraestructura ferroviaria**. BOLETIN de la ASOCIACION DEL CONGRESO PANAMERICANO DE FERROCARRILES. Buenos Aires, nº 328, p. 115-126, 1993.

LAUERMAN, E. D. **Ferrovia: Via Permanente**. 2007. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

LEAL, Samuel Domingos. **Soldagem aluminotérmica**. 5.ed. Maranhão: Centro Federal Técnico do Maranhão, 2004. p. 25-38.

LOMBAERT, Geert. Quantification of uncertainty in the prediction of railway induced ground vibration due to the use of statistical track unevenness data. **Journal of Sound and Vibration**. New York, v. 333, n. 18, p. 4232-4253, Sept. 2014.

MAGALHÃES, Paulo. **Contato roda-trilho**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. p. 15-96.

MAGALHÃES, Paulo. **Via permanente**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado)-Instituto Militar de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transporte, Rio de Janeiro, 2007.

MARTINS, Paulo Manuel. **Desgaste ondulatorio em caminhos de ferro**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado)-Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Lisboa, 2010.

NETO, Borges. **Elementos da via permanente**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. p.4-30.

PANADES, J. M.. El desgaste ondulatorio del carril: um fenómeno complejo por conocer todavía em su totalidad. **Boletin de la Asociacion Del Congreso Panamericano de Ferrocarriles**. Buenos Aires, v.79, n.334, p.44-72, Sept. 1996.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS. Pró-Reitoria de Graduação. Sistema Integrado de Bibliotecas. **Orientações para elaboração de trabalhos científicos**: projeto de pesquisa, teses, dissertações, monografias e trabalhos acadêmicos, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a American Psychological Association (APA) e o Comitê Internacional de Editores de Revistas Médicas

(VANCOUVER). Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <www.pucminas.br/biblioteca>. Acesso em: 25 de Junho de 2015.

PORTO, Telmo Giolito. **A infraestrutura da via férrea**. 2004. 81f. Tese (Doutorado)- Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo, 2004.

RAO, Singiresu. **Mechanical vibrations**. 4.ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. p.101-176.

RIVES, Ferdinand. **Tratado de ferrocarriles**. 3. ed. Madri: Ruerda, 1977. p.64-97.

ROLDO, Luís. **Análise de tensões residuais em trilhos ferroviários**, 1998. 265f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 1998.

SEMPREBONE, Paula da Silva. **Desgaste em trilhos ferroviários: um estudo teórico**. 2006. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Faculdade de Engenharia Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

SETTI, Jonh. **História do trem: tratado de estradas de ferro**. 2.ed. Rio de Janeiro: Reflexos Estúdio de Produção Gráfica, 2000. p.12-36.

STOPATTO, S.. **Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações**. 4.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1997. p. 44- 62.

TORO A.. Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad. **Tribology International**. Medellín, v.1016, n.10, p.2-32, sept. 2014.

TRIEPAISCHAJONSAK, N.. A hybrid modelling approach for predicting ground vibration from trains. **Journal of Sound and Vibration**. New York, v.304, n.12, p.141-154, June 2014.

VIDON, Walter. **Engenharia de via e malha ferroviária**. Curso para Supervisores e Especialistas da MRS – Material Técnico, versão 2012. p.34-201.

VILAA, P., BAEZAA, L.. **Rail corrugation growth accounting for the flexibility and rotation of the wheel set and the non-Hertzian and non- steady-state effects at contact patch**. 2014. 156 f. Centro de Investigación de Tecnología de Vehículos, Universitat Politècnica de València, 2014.

WEINING, L., WEIFENG L.. Study on the cause and treatment of rail corrugation for Beijing metro. **Journal of Sound and Vibration**. Beijing, v. 307, n. 25, p. 1-16, Sept. 2014.

ZEFENG, W., XUESONG J., LIANG L.. **Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings**. 2014. 164 f. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 2014.

APÊNDICE A – Recursos

Muitos componentes que foram usados na fabricação do equipamento foram retirados do almoxarifado da CBTU, não sendo possível estimar um valor preciso.

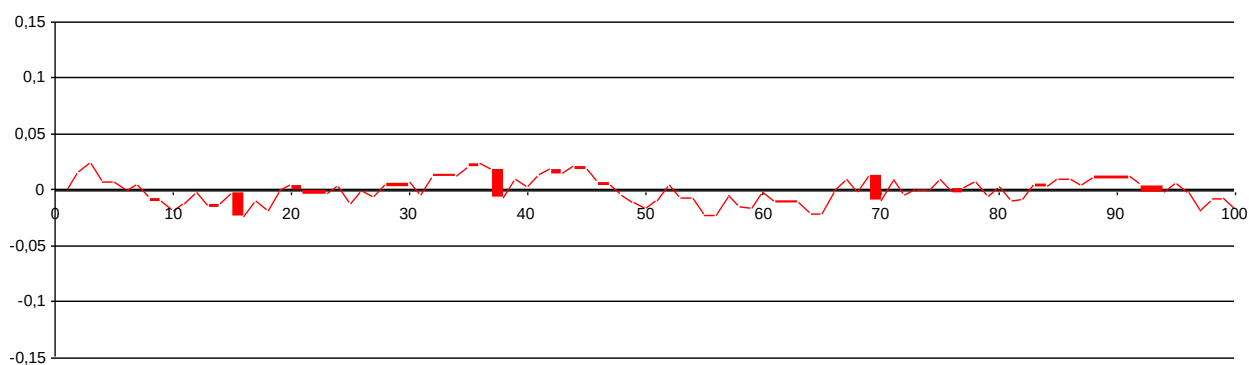
De uma maneira geral, para a usinagem do aparelho foram gastos R\$ 150,00 e para a montagem das placas do circuito, R\$300,00. Foram comprados 3 acelerômetros (pois um queimou nos testes), ao valor de R\$ 55,00 cada.

Foram construídos 2 equipamentos, mas um deles apresentou problemas quando testes de aferição foram realizados no laboratório na PUC Minas. Então, pode-se concluir que cada aparelho de coleta teve um custo médio de R\$ 500,00.

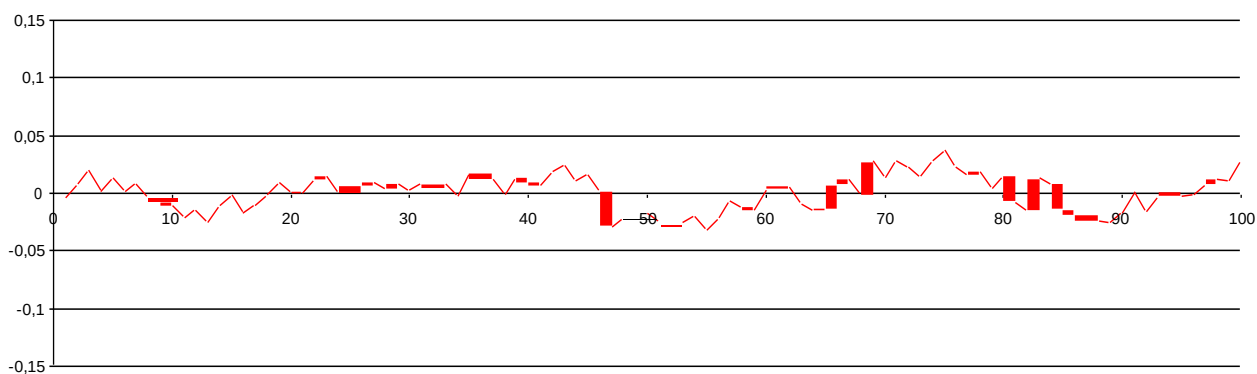
APÊNDICE B – Dados coletados na via

Os gráficos a seguir representam o perfil da corrugação obtido pela régua Rectiway, sendo o eixo das ordenadas representando a amplitude da onda, em milímetros, e o eixo das abscissas o comprimento ondulatório, em centímetros.

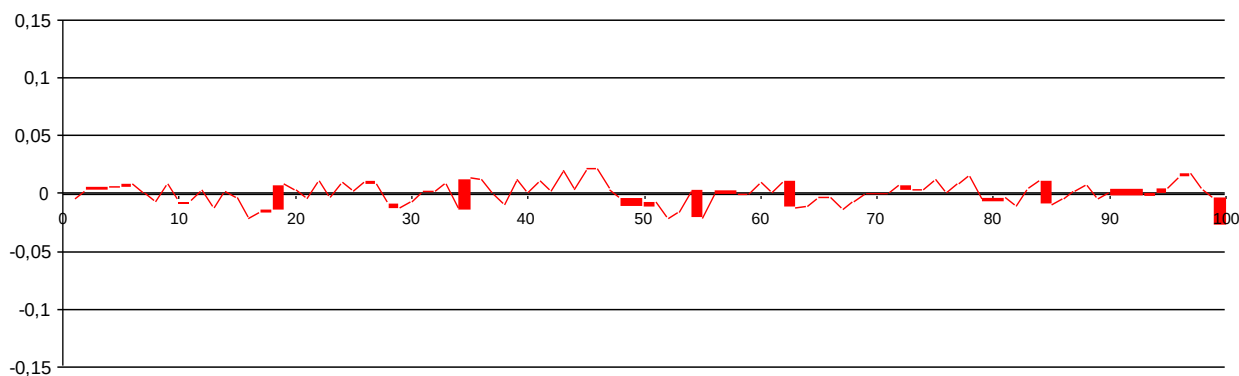
POSIÇÃO 01 – ESTACA 102+50 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



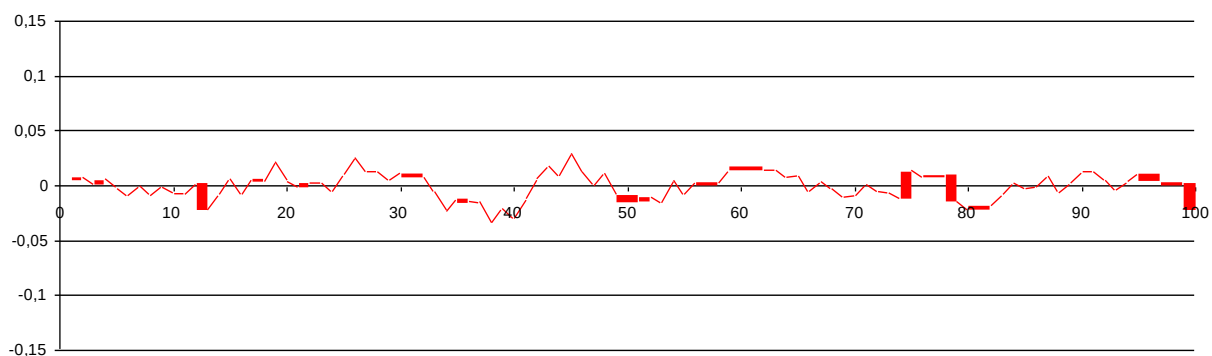
POSIÇÃO 02 – ESTACA 102+40 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



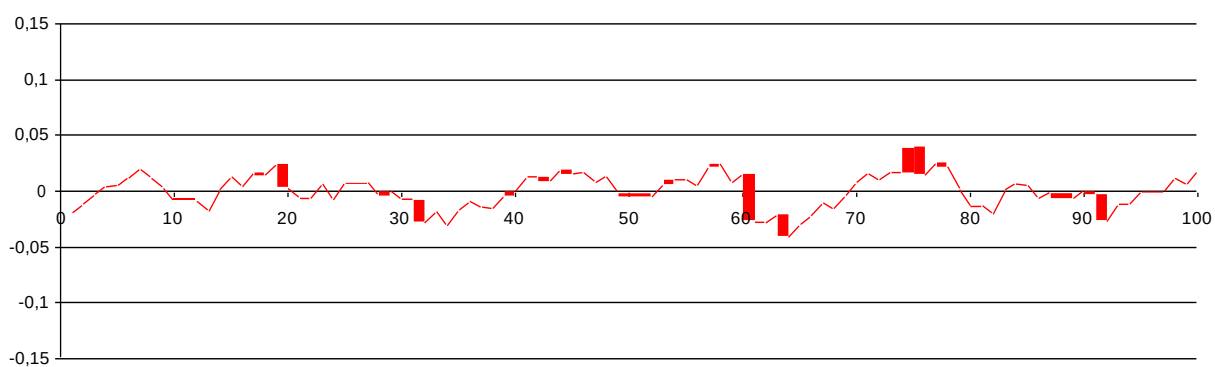
POSIÇÃO 03 – ESTACA 102+30 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



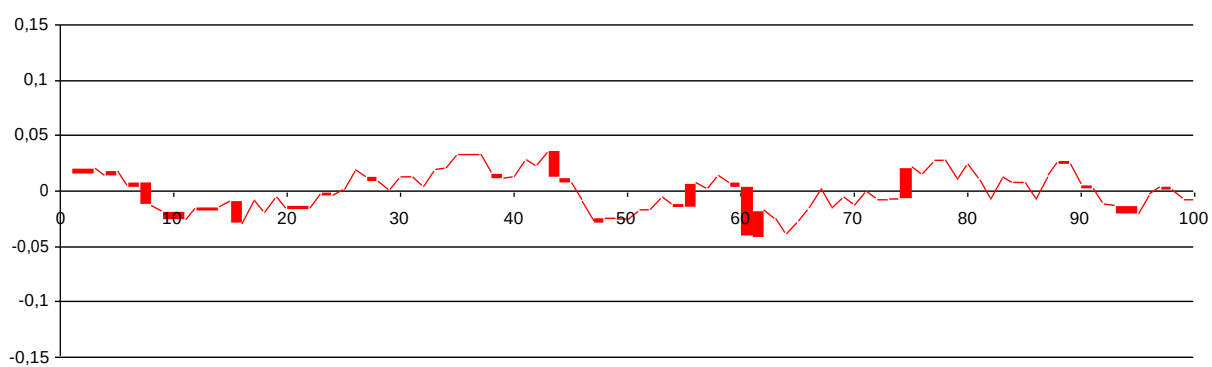
POSIÇÃO 04 – ESTACA 102+20 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



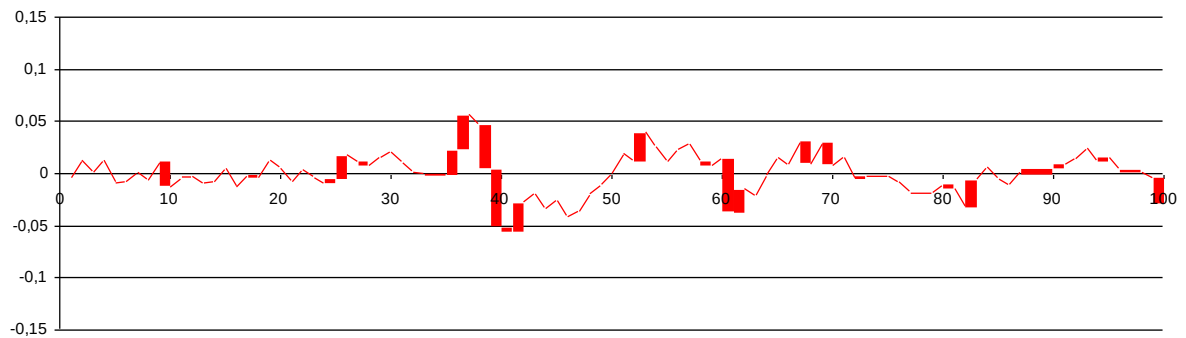
POSIÇÃO 05 – ESTACA 102+10 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



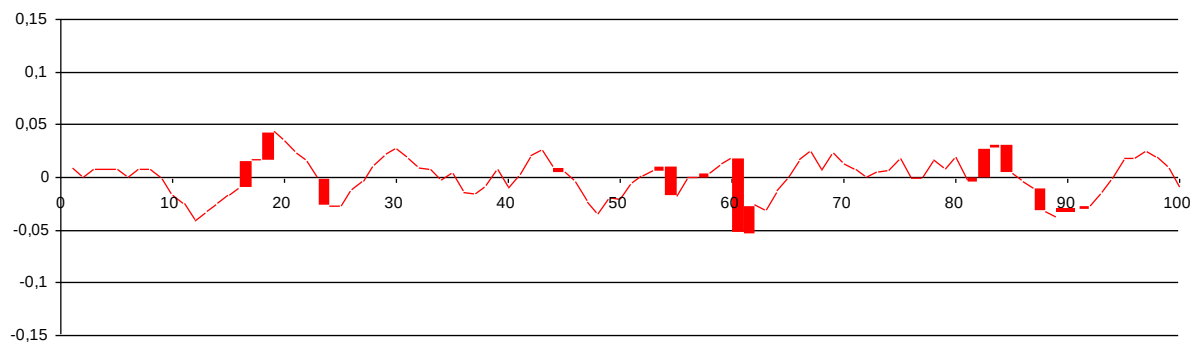
POSIÇÃO 06 – ESTACA 102+00 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



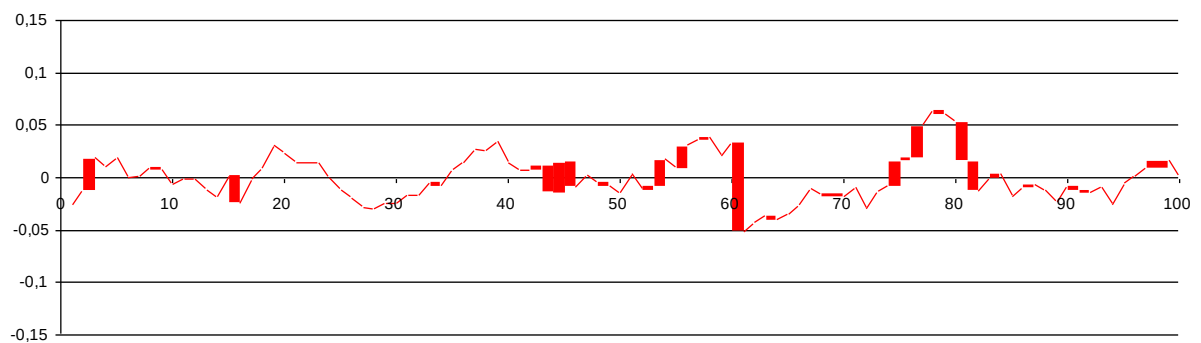
POSIÇÃO 07 – ESTACA 101+90 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



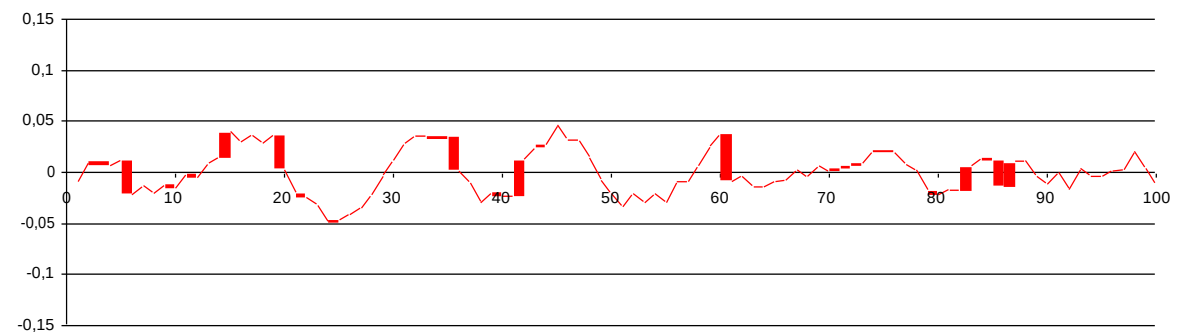
POSIÇÃO 08 – ESTACA 101+80 – TRANSIÇÃO DE SAÍDA



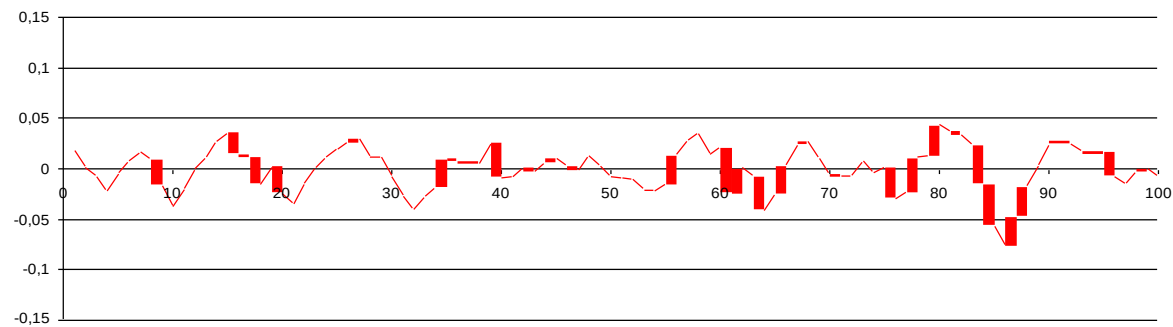
POSIÇÃO 09 – ESTACA 101+70 – CIRCULAR



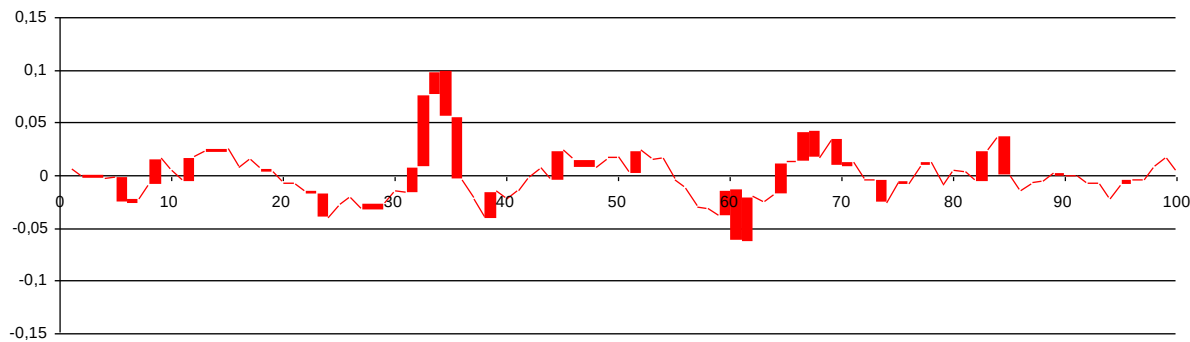
POSIÇÃO 10 – ESTACA 101+60 – CIRCULAR



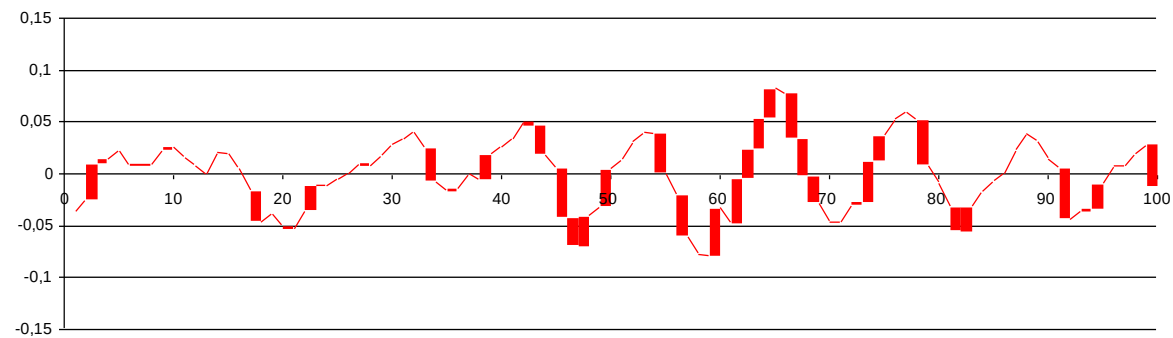
POSIÇÃO 11 – ESTACA 101+50 – CIRCULAR



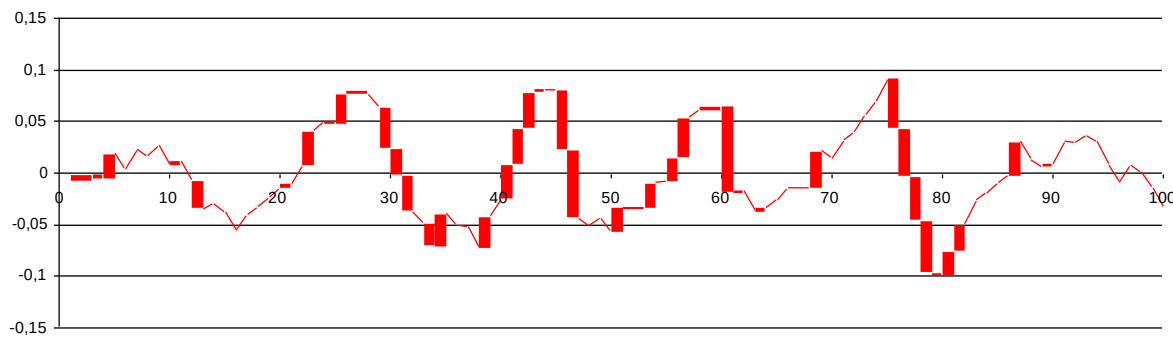
POSIÇÃO 13 – ESTACA 101+30 – CIRCULAR



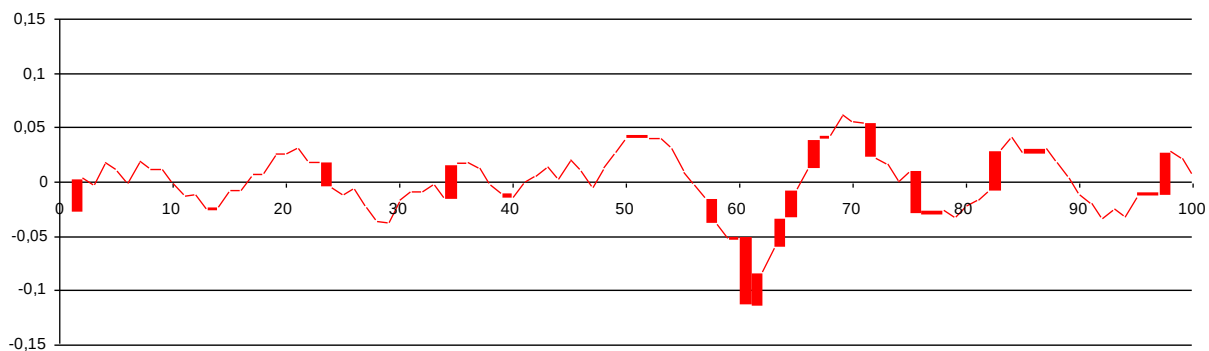
POSIÇÃO 14 – ESTACA 101+20 – CIRCULAR



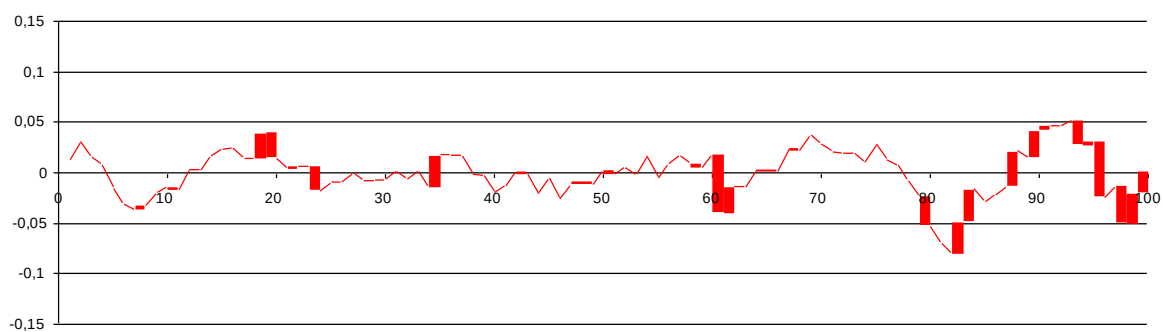
POSIÇÃO 15 – ESTACA 101+10 – CIRCULAR



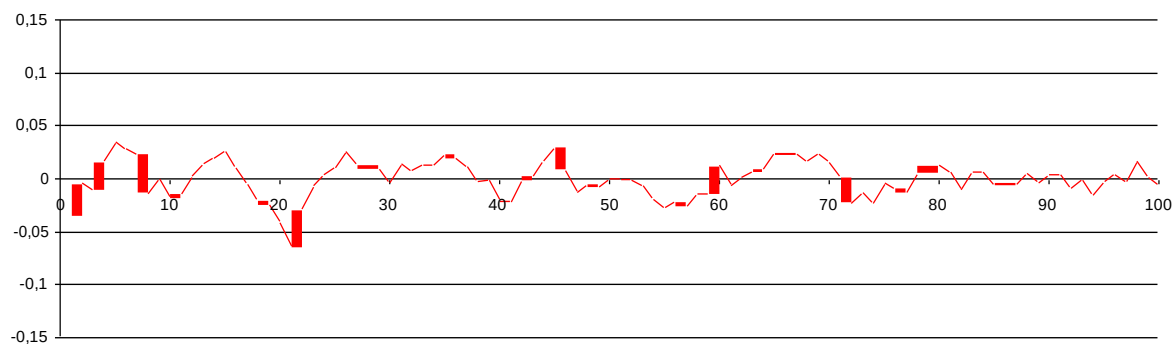
POSIÇÃO 16 – ESTACA 101+00 – CIRCULAR



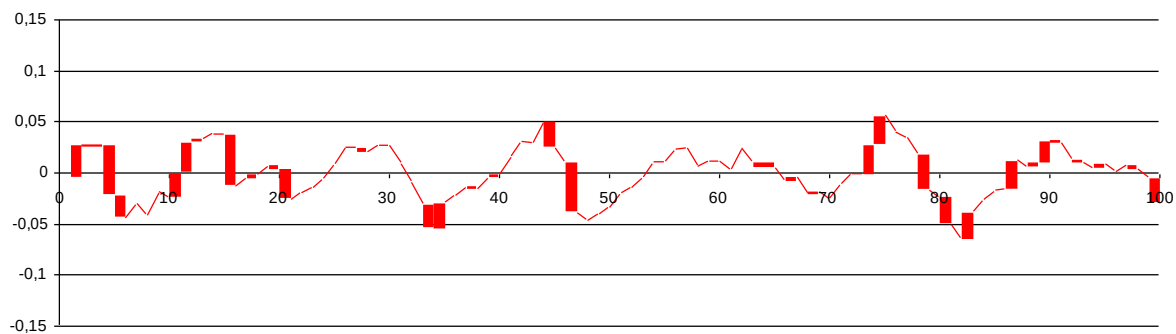
POSIÇÃO 17 – ESTACA 100+90 – CIRCULAR



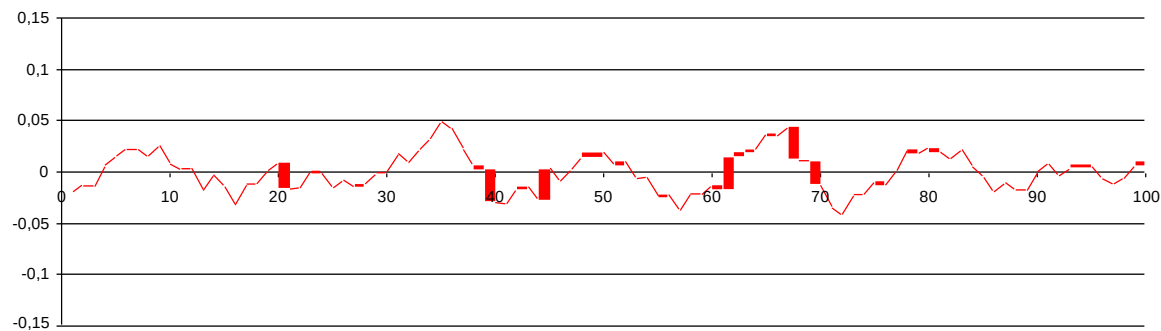
POSIÇÃO 18 – ESTACA 100+80 – CIRCULAR



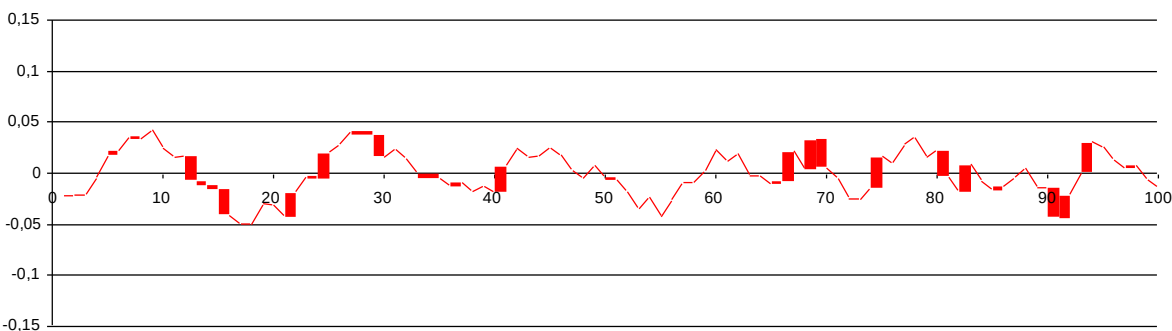
POSIÇÃO 19 – ESTACA 100+70 – CIRCULAR



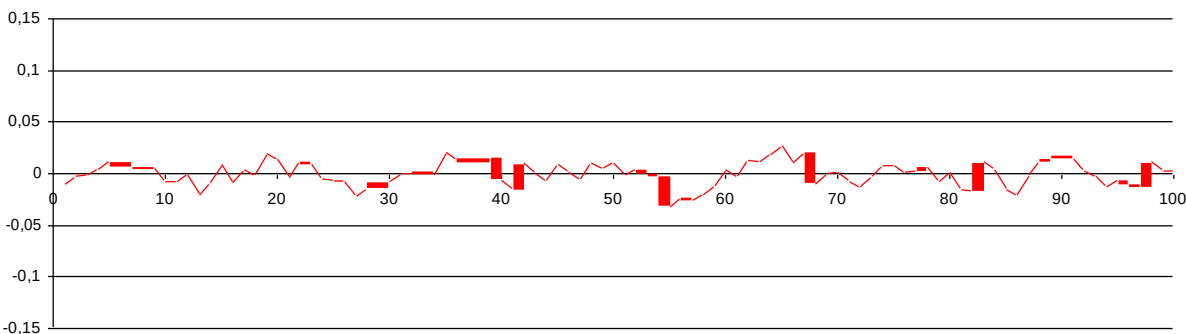
POSIÇÃO 20 – ESTACA 100+60 – CIRCULAR



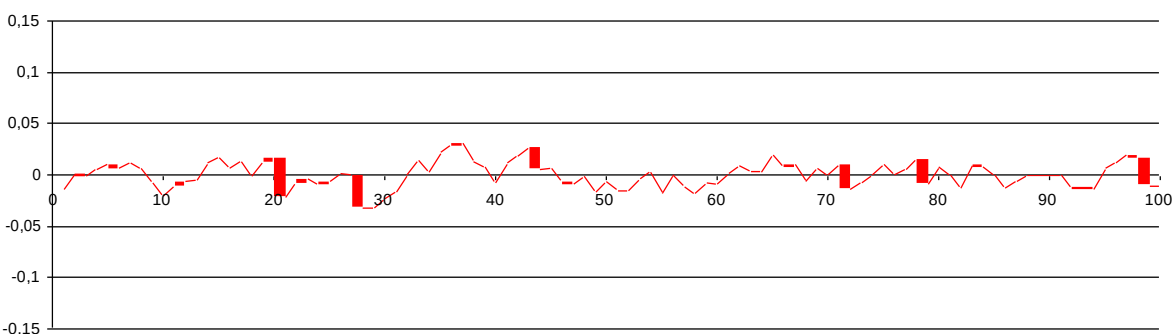
POSIÇÃO 21 – ESTACA 100+50 – CIRCULAR



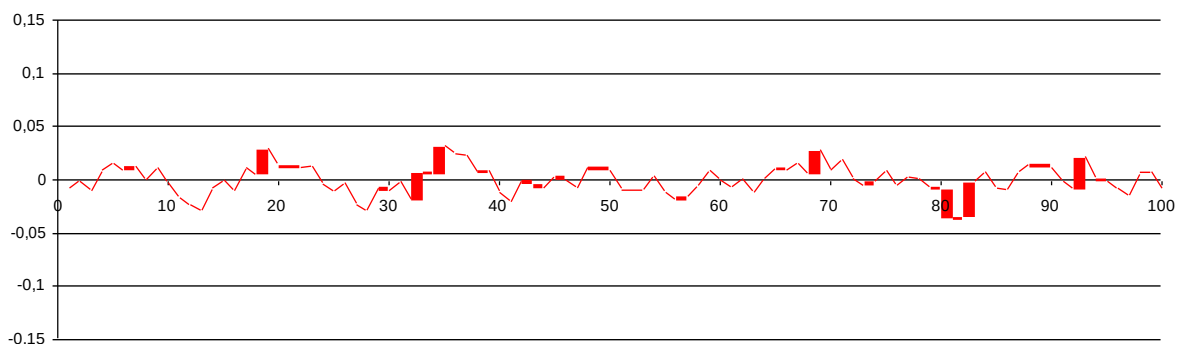
POSIÇÃO 22 – ESTACA 100+40 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



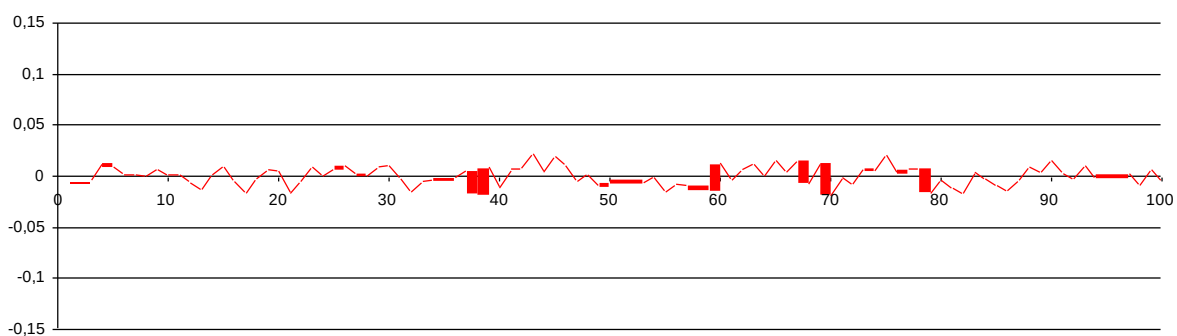
POSIÇÃO 23 – ESTACA 100+30 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



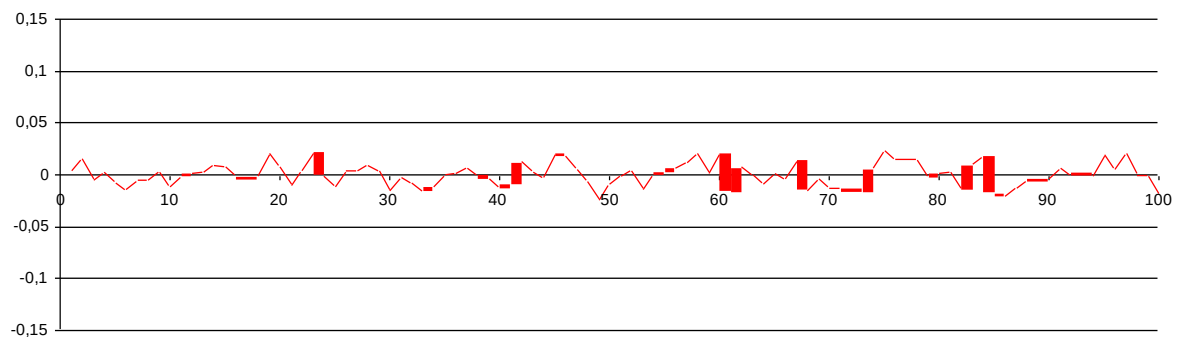
POSIÇÃO 24 – ESTACA 100+20 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



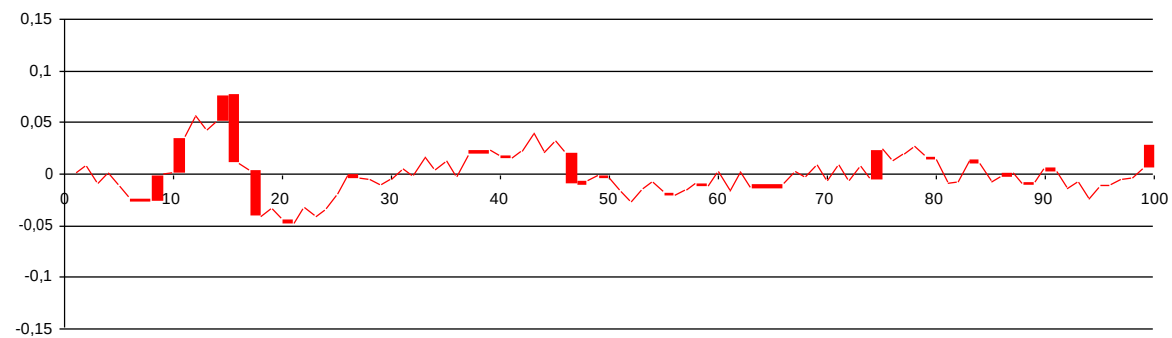
POSIÇÃO 25 – ESTACA 100+10 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



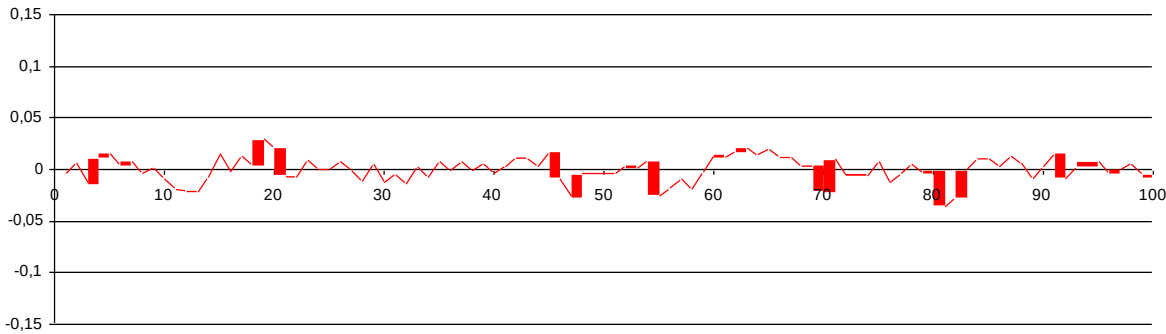
POSIÇÃO 26 – ESTACA 100+00 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



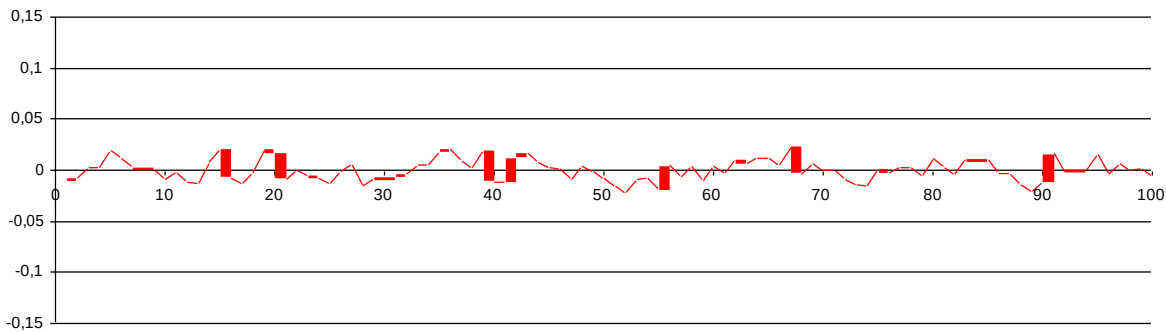
POSIÇÃO 27 – ESTACA 99+90 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



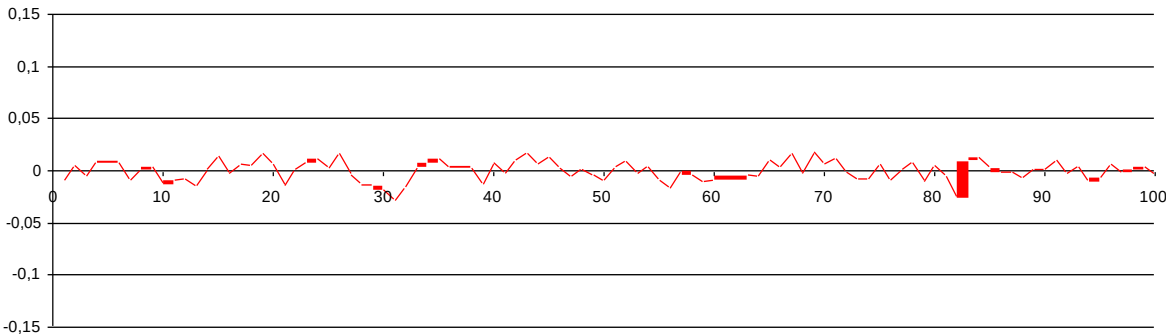
POSIÇÃO 28 – ESTACA 99+80 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA



POSIÇÃO 29 – ESTACA 99+70 – TRANSIÇÃO DE ENTRADA

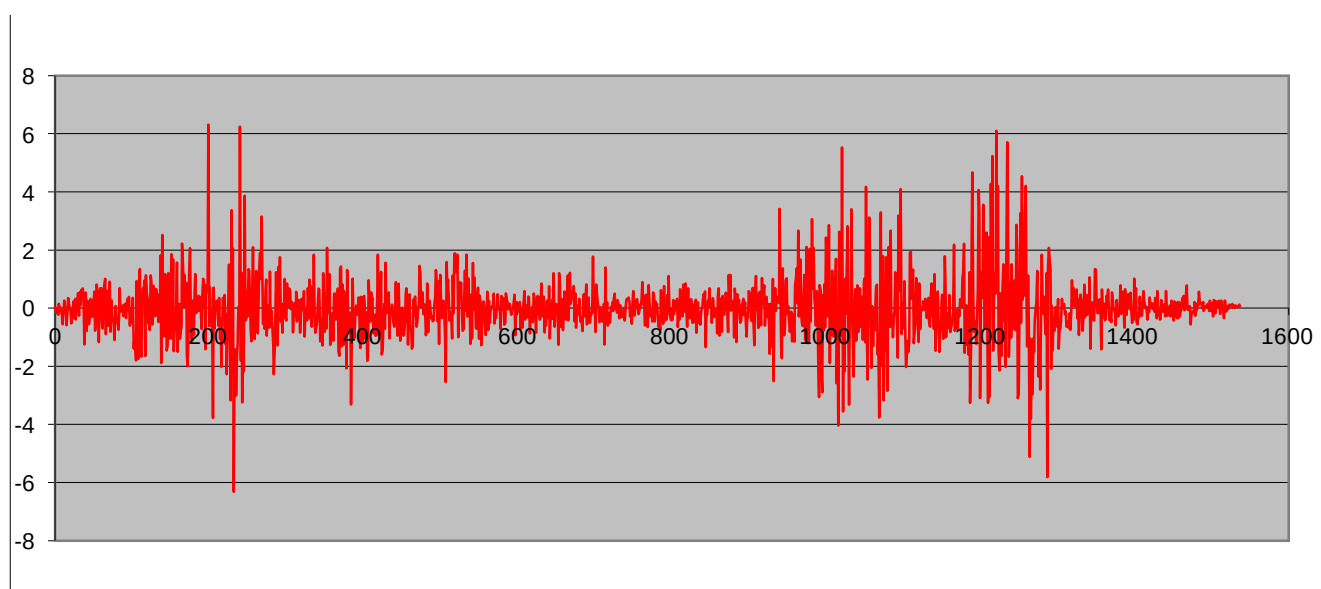
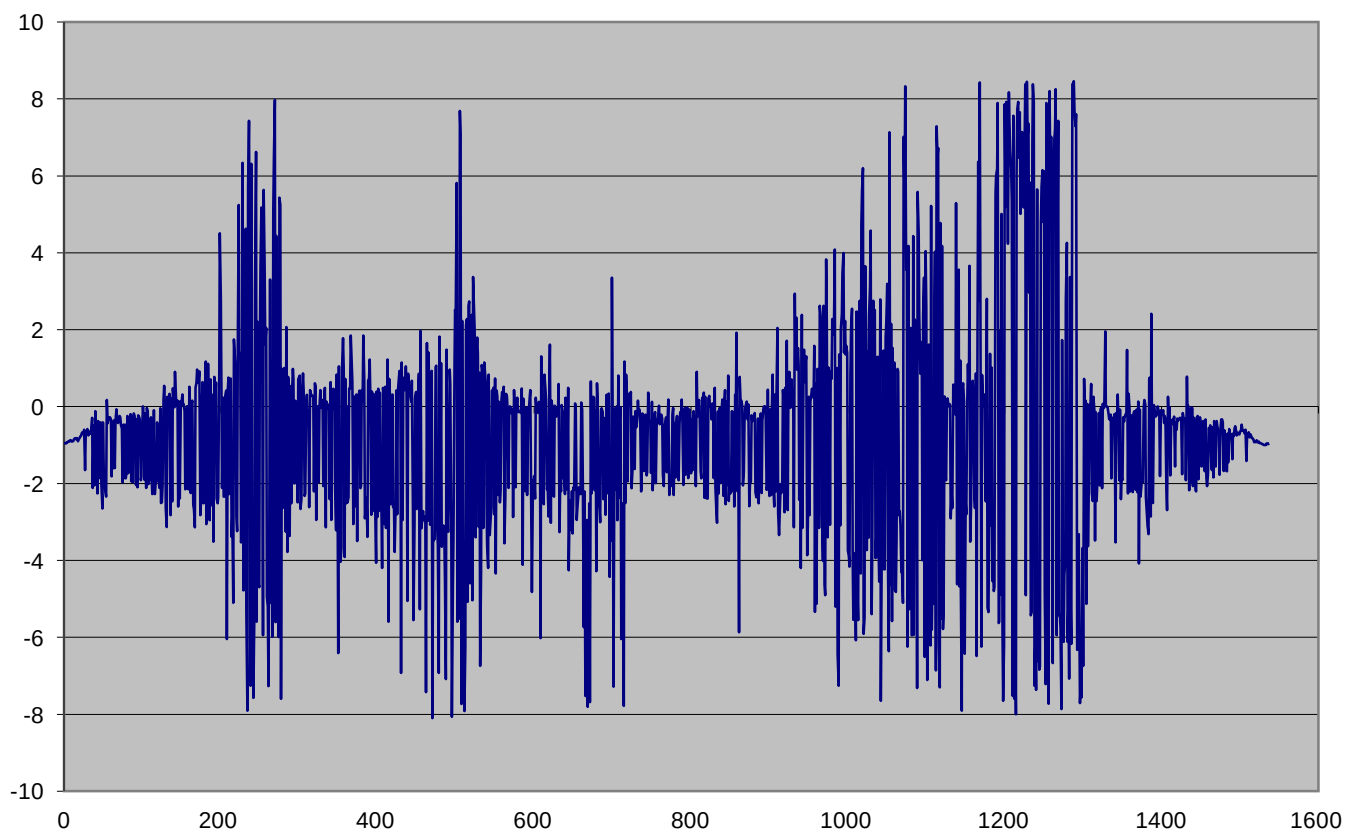


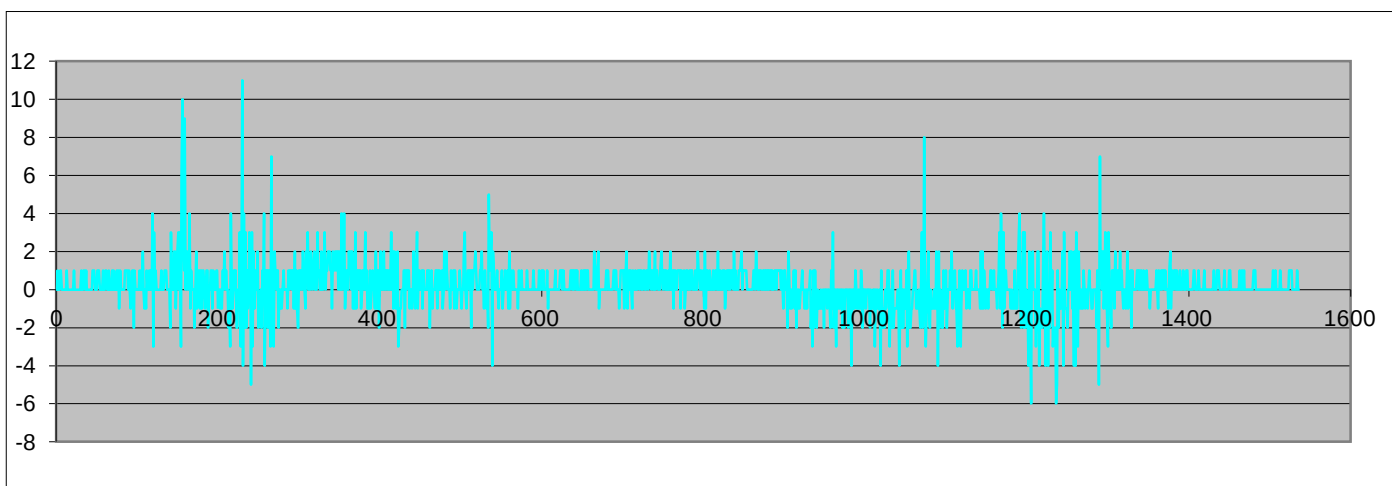
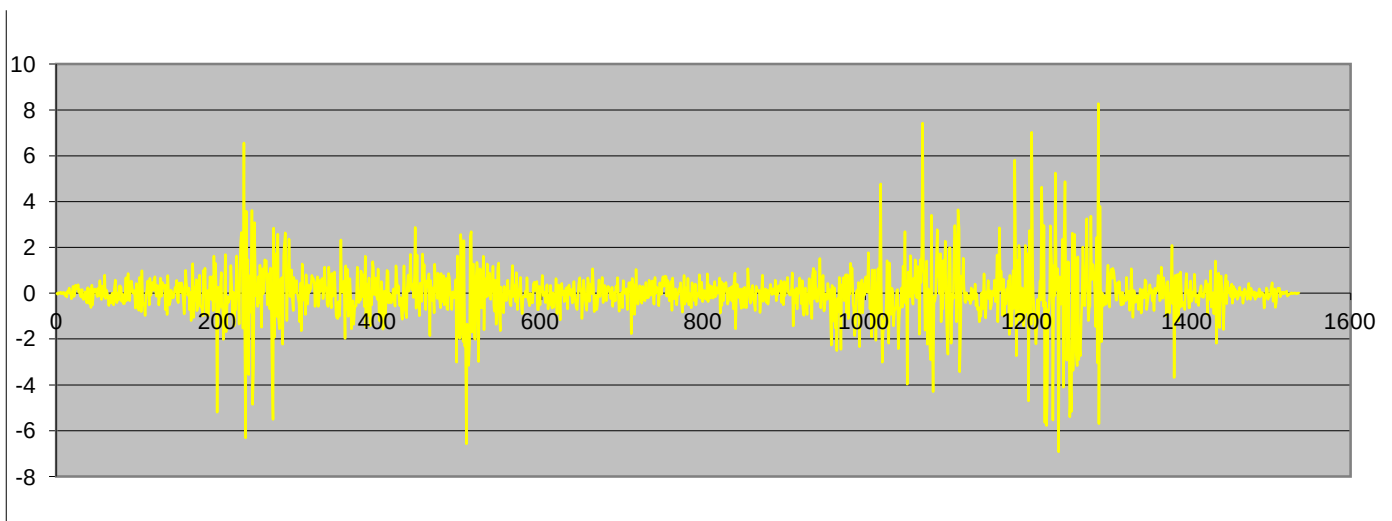
POSIÇÃO 30 – ESTACA 99+60 – TANGENTE



APÊNDICE C – Dados coletados de vibrações

Os gráficos a seguir foram obtidos com o protótipo do equipamento de medição de vibrações, sendo o eixo das ordenadas os valores da aceleração em G e o eixo das abscissas o número de amostras. A coleta de dados foi feita entre as estações Central e Santa Efigênia.





APÊNDICE D – Programa do Display do equipamento

```

C:\Program Files (x86)\PICC\Drivers\LCD_PIC24_32M.c
//LCD_PIC24_32M

// Un-comment the following define to use port B
// #define use_portb_lcd TRUE

int8 linha1=1;

BYTE const INI_LCD[4] = {0x20 | (lcd_type << 3), 0x0f, 1, 0} // {0x20 | (lcd_type << 3), 0x0c, 1, 0}
// These bytes need to be sent to the LCD
// to start it up.

// The following are used for setting
// the I/O port direction register.

BYTE lcd_le_byte() {
    BYTE dado;
    input(lcd_d4);
    input(lcd_d5);
    input(lcd_d6);
    input(lcd_d7);
    //lcd_rw = 1;
    output_high(lcd_enable); //habilita o display
    dado=0;
    //lê os quatro bits mais significativos
    if(input(lcd_d7)) bit_set (dado,7);
    if(input(lcd_d6)) bit_set (dado,6);
    if(input(lcd_d5)) bit_set (dado,5);
    if(input(lcd_d4)) bit_set (dado,4);
    //dá um pulso no enable
    output_low(lcd_enable);
    delay_cycles(2);
    output_high(lcd_enable); //habilita o display
    //lê os quatro bits menos significativos
    if(input(lcd_d7)) bit_set (dado,3);
    if(input(lcd_d6)) bit_set (dado,2);
    if(input(lcd_d5)) bit_set (dado,1);
    if(input(lcd_d4)) bit_set (dado,0);
    output_low(lcd_enable); //desabilita o display
    delay_cycles(2);
    return(dado);
}

//envia dado de 4bits p/ display
void lcd_envia_nibble( BYTE dado ) {
    output_bit(lcd_d4, bit_test(dado,0));
    output_bit(lcd_d5, bit_test(dado,1));
    output_bit(lcd_d6, bit_test(dado,2));

    output_bit(lcd_d7, bit_test(dado,3));
    //dá um pulso na linha enable
    delay_cycles(2);
    output_high(lcd_enable);
    delay_us(2);
    output_low(lcd_enable);
}

void lcd_envia_byte( BOOLEAN endereco, BYTE dado ) {
    output_low(lcd_rs);
    //while ( bit_test(lcd_le_byte(),7) ) ;
    delay_cycles(2);
    output_bit(lcd_rs, endereco);
    delay_us(100);
    //lcd_rw = 0;
    output_low(lcd_enable);
    delay_cycles(2);
    //envia a primeira parte do byte
    lcd_envia_nibble(dado >> 4);
    //envia a segunda parte do byte
    lcd_envia_nibble(dado & 0x0f);
}

void lcd_ini() {
    BYTE conta;
    output_low(lcd_d4);
    output_low(lcd_d5);
    output_low(lcd_d6);
    output_low(lcd_d7);
    output_low(lcd_rs);
    output_low(lcd_enable);
    delay_ms(15);
    for(conta=1; conta<=3; ++conta) {
        lcd_envia_nibble(3);
        delay_ms(5);
    }
    lcd_envia_nibble(2);
    for(conta=0; conta<=3; ++conta) lcd_envia_byte(0, INI_LCD[conta]);
}

void desl_cursor()
{
    lcd_envia_byte(0,12);
}

void lcd_pos_xy( BYTE x, BYTE y ) {
    BYTE endereco;

```

```

switch (y)
{
    case 0: endereco = lcd_seg_lin; break;
    case 1: endereco = lcd_ter_lin; break;
    case 2: endereco = lcd_qr_lin; break;
    default: endereco = 0; break;

    endereco+=x-1;
    lcd_envia_byte(ú,úx8ú | endereco);

void lcd_escreve( char c) {
    switch (c) {
        case '\f': lcd_envia_byte(ú,1); //1=apaga e reorna à primeira linha; 2= reorna primeira linha
                    linha=1;
                    delay_ms(2);
                    break;

        case '\n': if (linha<4) linha++;
                    break;

        case '\b': lcd_pos_xy(1,linha); break;
                    lcd=envia_byte(ú,úx1ú); break;
        default: lcd_envia_byte(1,c); break;

char lcd_le( BYTE x, BYTE y) {
    char valor;

    lcd_pos_xy(x,y);
    while ( !bit_test(lcd_le_byte(),7) ); // wait until busy flag is low
    output_high(lcd_rs);
    delay_cycles(10);
    valor= lcd_le_byte();
    output_low(lcd_rs);
    return(valor);
}

```

APÊNDICE E – Programa da memória de configuração

```

C:\Program Files (x86)\PICC\Drivers\24512_Proc_24F.c

#define EEPROM_SDA pin_D9
#define EEPROM_SCL pin_D10

#use i2c(master, sda=EEPROM_SDA, scl=EEPROM_SCL)

#define EEPROM_ADDRESS int16
#define EEPROM_SIZE 65536
#define EEPROM_DEVICE int8

void init_ext_eeprom()
{
    output_float(EEPROM_SCL);
    output_float(EEPROM_SDA);
}

void write_ext_eeprom(int8 device, int16 address, BYTE data)
{
    int1 status;
    i2c_start();
    i2c_write((0xa0 | (device<<1)));
    i2c_write(address>>8);
    i2c_write(address);
    i2c_write(data);
    i2c_stop();
    i2c_start();
    status=i2c_write(0xa0 | (device<<1));
    while(status==1)
    {
        i2c_start();
        status=i2c_write(0xa0 | (device<<1));
    }
}

BYTE read_ext_eeprom(int8 device, int16 address)
{
    BYTE data;
    i2c_start();
    i2c_write((0xa0 | (device<<1)));
    i2c_write(address>>8);
    i2c_write(address);
    i2c_start();
    i2c_write((0xa1 | (device<<1)));//i2c_write(0xa1)
    data=i2c_read(0);
    i2c_stop();
    return(data);
}

```



```

spi escreve by (end m:$ //endereco
LSB dad0=spl le-by(); //lê o dado de 8
bb ou puhigh(spl cs mem0);
output-high (spl-cs-mem1);
return-{dado}; - -

bye spl_le_sus_eeeprom(int sel_mem)//le o registrador de estado da memoria
{
    byte dado;

    aiva escrea_eeeprom(sel mem);
    if (sel mem==0) output_low(spl cs mem0), output_high(spl cs mem1); //seleciona a memória
    i04l-mem*1) output_low(spl-co-mem1), output_high(spl-co-mem0);
    spi escreve byte (spl-rdsr cmd); //envia comando de leitura do registrador
    dad0 = spl le-byte(); //dado de 8 bits
    output_high spl cs mem0;
    output-high (spl-cs-mem1);
    return dado; - -

void spi_apaga_eeeprom(int32 end_m:$, int sel_mem)
{
    //ouépué low(spl cs); //seleciona a memória
    //opi escreve by (spl wren cmd); //envia comando de escrever
    //while(satus_eeeprom) spi_le_status_eeeprom(void)
    ativa escrita_eeeprom(sel mem);
    delay-us (:00); - -
    if (sel mem==0) output_low(spl cs mem0), output_high(spl cs mem1); //seleciona a memória
    i04l-mem*1) output_low(spl-co-mem1), output_high(spl-co-mem0);
    spi escreve byte (spl-se cmd); //envia comando de apagar -
    spi escreve-byte (end-m:$ >> 16); //endereco MSB
    spi-escreve-byte (end-m:$ >> 8); //endereco
    MSB spi-escreve-byte (end-m:$); //endereco
    LSB opthigh spl cs mem0;
    output-high (spl-cs-mem1);

void opi_apaga_toda_eeeprom(int sel_mem)
{
    //output_low(spl co); //seleciona a memória
    //spi escreve-byte (spl-wren cmd); //envia comando de
    escrever
    aiva escrea_eeeprom(sel mem);
    delay-us (:00); - -
    if (sel mem==0) output_low(spl cs mem0), output_high(spl cs mem1); //seleciona a
    memória
    if (sel mem==1) output_low(spl-cs-mem1), output_high(spl-cs-mem0);
    spi escreve-byte (spl-all cmd); //envia comando de
    apagar - output_high(spl-co-mem0); -

    ou puhigh(spl cs mem1);

void desativa_escrita_eeeprom(int sel_mem) //desativa escrita na memória
{
    f (sel mem==0) output_low(spl cs mem0), output_high(spl cs mem1); //seleciona a memória
    i (sel mem==1) output_low(spl-cs-mem1), output_high(spl-cs-mem0);
    spi escreve-byte (spl-wrdsr cmd); - - -
    output_high(spl cs mem0); -
    output_high(spl-cs-mem1);

void escreve_sacus_eeeprom(int32 dado, int sel_mem) //escreve no registrador de estado da memoria
{
    aiva escrea_eeeprom(sel mem);
    if (sel mem==0) output_low(spl cs mem0), output_high(spl cs mem1); //seleciona a memória
    i (sel mem==1) output_low(spl-cs-mem1), output_high(spl-cs-mem0);
    spi escreve-byte (spl-wrdsr cmd); //envia comando de escrever no registrador
    spi-escreve-byte(dado); //dado de 8 bits
    opthigh spl cs mem0;
    output-high(spl-cs-mem1);
    delay_ms (15); - -

```


[illegible]

```

;;v _l:tW 1
;
I
1.tftt:n0.u hnb*:
t'-t't:.ll.- ueu*:r
r.tr:<:(tld_u1j);.....* f *QU.ton:&h; P_ JI.Us.*r " :t't eu:.*tr
!"tld.Uia-t 1.n'tU ".*tO.ta.ll.l:- 1 iiAi.1)l *qJ1,iQto.l :-ore:na :t:tU\A :l:..lll
t:illV.&.:1!:-e:aYu-t-;t'l'-4iUll:1 1 <>xi 1: 'F>:Uur:..a :-r.ca.. :t'l'IM t :d4l lt ll
le-l:..ll.or:..>:rct:Gil"H-:..v:l:l't =:.*-a:e:f*!.*:t't:-1:t
cect-1:..:U":
Ati:U-1tt't t ii ! U\ <:ih' - - lhf _ t' t- ,o:t'f&ot_Mi"" l. h.,J>Ji :1 6#o,:- :e *elia
G<o.""P_Lx#;1;
willttt"-A u.: u t:ll cu: l' c:n_u;-:, t.e.)le.r. ll,lb..le7J9t:..l 11/ al7(11)U# ...U -}
ll't:l (QU!!
L:thr:l:oa<"6iYUJ «nPJ*: *xl4lr.c*-;- e f.*:t.i*:J,f;- ;n*t
U'll.t-...-:,tl_p_.,pJ*): 11"-IU* IM:lq.l; • c-n_l ll'r • l u- 1:; • _., <M:Ur - Funl:u.r- • "l-:r- t--t-fl:Ac

if(!bco_cxt is linha==3)//configurou o método auto ativação
1.liba.:
•Mh it:ject l tr:=u-11 C_t.. h;-_u. .... -toV'tv,U; ,o:d.*... U);. ATl<:;aa 1•• U;il; f;-ha
: 1 1t.a:
.t'f...tp:-c:t!!>! - n.l,r na:J:J>>r
1"11"-l_FUA:lt :. ""d t:t-lO;
III
I
P:l...l U: U 11-fi.U- U YAU-U...n HI,a.l [:t...A,l _ u:t[J.*i;
...c:-l:u t-U-U-t u. lpu:111...:1 :a:r..._] "rA t-:
:t.o:;;dl;" H ... a-u at... *na:{})•...-JPnei:I-:"
ltft:t-e _.,; luua--H *d J...ntJ ...d_p...uttt;
11'tt= cr:t:UM&- ll=d=a!;
*a-c 1:T-t'll- u u.eu--:,•!*-:
• a_:l -atj...u:lfr
•a_1,k*..H l': :o:
t_1) ) a_1: :o NW
l=t,M!ll _uo:J*... _ _utt"l;C'h:l:L;t;:.. :t:l:Q.ft :IMJO: eut:;..._lAa*.*a ttr:alJ&r-:(1
"ftUlla-IM 41l.YU -;:tW.ta..t!! -): : u:lou :areo: u. eol\U\ag :lo :u.t* :
!"t:t...&*:=-11...l-1"=-1"=1"=COJl:J l :e:~> )1/f _l:l:U -;t:t:..... "el:IV!Wl: U..m* l
: _...-t. "tr *!"l:oa-}i"" :te-Y...u -e:4 :e:el :n...:1-t:n*=
l&odl_c-OCleU
"e,l h 1 f t _ : 11 tt:<IH' : :.=.u; :h:cet,c - <J:l-<:Mj:..l:t. U/_utit: - = t: :t :t :t -lt-:t
:el:ut l-...:Z...:
11hl.tofE = U tn_o.l... U t:t_c_;" U1Jlt.rna:nt ,e leZ:nt lo) •...:aut:l;-aa :...l.u: f:t-e.Ul
lwtlh: 1:U1f
•*_FafA=J-4t

if(!bco_cxt is linha==4)//configurou o método excessão
Hllil-•lt
Jh!'Cit:c:M 11 ur._ci,Tll t: t;-*t ,hr_tt:t:tO,•Htr,lit:,lll;ti,U.C ,O•hJ,.a.ta:tttf ..... ,ta:;"" nr-: •:ha
twJlt...l T!Gir
1r tnl _r:utr l:l '• l'ttl-"••L' l:;OJ
•
I
U111tU1OU U <tal _r*t1l lt:tiYd.J*Ua!1)...6JU&ltldJ1""1t(CO U t'tu. tC _1.), llO
ltl nt :au u ••1r...UI *to u •dJ.u""11 l: ;••Jara t>IH•va J•r.ai:J•vr tctlltr;..VIA t( U A 1:
ltl u11tn...nt U '•1J"•-l t _OOiV•l..J•rMl)lJ•v•1J:U&m)lJ 1Jt
'l.. HlIDtr...=U ,l..l r...UJ $Oiv_l_...r1Uft)l)•ul.UUlll)Jl•tt
'r1ttQ...cr:t...r
JlJU :U*tal ttr:..C li
••:tn...0 •rn.
fu'l'trlc.d.uc.r.v*." : UJ lLA cc-r:Ma n N:l U.CIGl'H•"H
U*al _l".....UI 101)tttlUHL_C_turt...,"HdU"oa1l,..thJtl l..11 t:J,t • 1h t ... ttf
l••:nr:tfllc-o .hr...": t:••. thn l•llar.i • ll;! • -•tt;
ICl...tTU' _tal l:7 •cll 1 a4)l lJ11-x tlU..nt C11fUt ll•ethlfl•• ll•1Uifla
lcd w.nna b;otej,C;..Ot:l :utM'A uu u1l;.,tu• cht•n•
ouY.c:uu;PllJ
VMlti•Jtn..cnt 11 bttt..l t t l •tll...tlllu,..14ta)( ...J..Wt...lll9tiJLrtl.lI•at.ul•tóttrl •;oara t-!t• •u••ult •
o. u...lWitOir
...uJ•t"lt c.M H •H.ISU u •"".'''u '••• hr.Mt• U:l:l•V."•tilnrt •tw•A •lo•onl• ur u..tt ut
1rJlJ.hll lf
v! J;•tdii)J•Jr
I
...tUd'tUL,Cl'U 11 t\..n.,CUif llll'.•t tthr•H•HI, ll'Ullt.lJlOhtLIC'lo _ _ ht_11:tlolOUtl ,lOl&Ujlo t.r.t•u tU... l t •
...t...t..JOHt1.ltl,
""*Ul•leu..un u e n. tu ''11n.u1 u •ulllttpt; utt ,l!ld-Y. tUllll•luar•ltua _ _ , •! J:httt n•11
VlllJhl•a.l 1
I
tUUtcc.u•rtY*,• l' XnoDO l. C:dn A11UllU.Gtt:,fl J.lUf Ml• •11
M1adltf..rt u t'n_du u ttn...lu..u..o.c•hY..tUOHl q\atll• alow\hoc&o •u pr•ua ...
JlhhJl.Ut.C'flloli bttl.CU11 *t-,"tfCHtr...U1O, llU'IL.lll lld.lO.,11th;_a.tlaW1tl• na•ue bo'tMt tUM t'>lt•
wtr"t.lIUCJ r
•hy'tt..ll , ll
snt a;.,
•
I
l'•lfl...dHllM••!!
gt,l'kl) Utib&•!
Ft'ldtct:O ••Cet-*,•C:tll.lt'J.,;OJ:'Uilml ll ltrODC> fuQ9Ut'l•a t(l.Q(lrd""D:C)" tZ&UNOt $l = _u,h U •tv-IS.IUM.lit.
l!tUth--"tlca..n&•.t tiO,I;HtO l ll4 111//J. •Ut n• Cltt t l l'• c•lw.fl ll• Tol't< •
HtU.tlll...tloG •M'l• tly:t'f,d atO l ll14111(f ttcJ.na ClU T l' C4hr•l• G• Urot>:
lc41...eYll...O'Ul,...- 4'll outtr.l. Ut.t Utl..f•l• •u•iu
llU,l_C'UUCldll
/ •-••• o OOO
lIt ll:c•.llt U 2lf,f,lo-oJ /C l'ottflf:lo t.4tiNDth•fi•HC&a ceffiO llllt10clt e t>tt•QtJl

```

```

linha=1;sai=0;
while(!btn_cn || !btn_dir || !btn_esq) ler_bo_ao(), ou_puhigh(LED), delay_ms(150); //aguarda boões serem
solos ou pulsoLED;
if(val-param[4]>50) val_param[4]=50;
if(val-param[S]>50) val_param[S]=50;
do
{
    if(!btn_dir && linha==1 && val_param[4]<50) val_param[4]++;
    if(!btn_esq && linha==1 && val_param[4]>10) val_param[4]--;
    if(!btn_dir && linha==1 && val_param[S]<50) val_param[S]++;
    if(!btn_esq && linha==1 && val_param[S]>10) val_param[S]--;
    if(!btn_cn && linha==1) linha=;
    else if(!btn_cn && linha==) sai=1;
    aux_flt=val_param[4];
    aux_flt=1000/aux_flt;
    //para manter a Coerência, pois val_param[S] é a taxa de amostragem da pior situação dentro da val_param[4]
    if(val_param[S]>val_param[4]) val_param[S]=val_param[4];
    aux_flt=val_param[S];
    aux_flt=1000/aux_flt;
    printf("fREQUENCIA AMOSTRAGEM T=%Lums f=%LfHz\n", T, Lums, f);
    if(linha==1) lcd_envia_byte(0, (0x50 | 0x40)); //posiciona cursor na coluna 1 da linha 1
    if(linha==) lcd_envia_byte(0, (0x50 | 0x54)); //posiciona cursor na coluna 1 da linha 3
    lcd_envia_byte(1, 0x04); //desenha seta grande para direita
    desl_cursor();
    cnt_mprz=0;
    //aguarda boões serem solos ou seq. //&& cnt_mprz<0 && !flg_bo
    while(!btn_cnt || !btn_dir || !btn_esq) ler_botao(), output_high(LED), delay_ms(30);
    output_low(LED);
    //aguarda algum botão ser pressionado
    while(btn_cnt && btn_dir && btn_esq && !sai) ler_botao(), delay_ms(150), flg_bot=0;
} while(!sai) 7
if(!val_param[S]) val_param[3]=1; //usou sempre a amostragem insaranea
else val_param[3]=7; //usou a pior situação dentro da janela de amostragem
}
if(!btn_cn && linha==) //configurou deslocamento como método de amostragem
{
    linha=1;sai=0;
    while(!btn_cn || !btn_dir || !btn_esq) ler_bo_ao(), ou_puhigh(LED), delay_ms(150); //aguarda boões serem solos
    output_low(LED);
    aux_16=make16(val_param[9], val_param[10]); //carrega o diâmetro da roda
    if(aux_16>1000 || aux_16<650) aux_16=1000;
    //define o diâmetro da roda
    do
    {
        if(!btn_dir && aux_16<650) aux_16++;
        if(!btn_esq && aux_16>1000) aux_16--;
    }
    if(!btn_cn) sai=1;
    printf("TOESLOCW.ENTONOA! EIRO ROOA\Lumm", aux_16);
    desl_cursor();
    cnt_mprz=0;
    //aguarda boões serem solos ou 2seq.
    while(!btn_cnt || !btn_dir || !btn_esq) ler_bo_ao(), oupu_high(LED), delay_ms(30);
    output_low(LED);
    //aguarda algum botão ser pressionado
    while(btn_cnt && btn_dir && btn_esq && !sai) ler_botao(), delay_ms(150), flg_bot=0;
} while(!sai) 7
val_param[9]=aux_16>>8; //SB
val_param[10]=aux_16<<8; //LSB
perimetro=aux_16;
perimetro=(perimetro/10)*pi; //passa para centímetro

    //printf("f=3.3fcm", perimetro);
    //delay_ms(3000);
    //define o deslocamento
    linha=1;sai=0;
    //aguarda botões serem solos
    while(!btn_cnt || !btn_dir || !btn_esq) ler_botao(), output_high(LED), delay_ms(150);
    output_low(LED);
    if(val_param[4]>50) val_param[4]=50;
    if(val_param[S]>100) val_param[S]=50;
    do
    {
        if(!btn_dir && linha==1 && val_param[4]<100) val_param[4]++;
        if(!btn_esq && linha==1 && val_param[4]>10) val_param[4]--;
        if(!btn_dir && linha==1 && val_param[S]<100) val_param[S]++;
        if(!btn_esq && linha==1 && val_param[S]>10) val_param[S]--;
        if(!btn_cnt || linha==1) linha=;
        if(!btn_cn && linha==) sai=1;
        aux_flt=val_param[S];
        aux_flt=1000/aux_flt;
        desl_cursor();
        desl_cursor=(desl_cursor*perimetro)/48; //calcula a distância entre os pulsos em
        printf("TOESLOCAI.ENTONOA! EIRO ROOA\Lumm", T, Lums, f);
        if(linha==1) lcd_envia_byte(0, (0x50 | 0x40)); //posiciona cursor na coluna 1 da linha 1
        if(linha==) lcd_envia_byte(0, (0x50 | 0x54)); //posiciona cursor na coluna 1 da linha 3
        lcd_envia_byte(1, 0x04); //desenha seta grande para direita
        desl_cursor();
        cnt_mprz=0;
        //aguarda boões serem solos ou seq.
        while(!btn_cnt || !btn_dir || !btn_esq) ler_botao(), output_high(LED), delay_ms(30);
        output_low(LED);
        //aguarda algum botão ser pressionado
    }
}

```



```

init_ext_eeprom();//inicializa a :4CS1:

end spi=0;
opi:alto_z():

delay mo(50):
end_sPi=u;
n=:
aux_3:=0;
aux_16=0;
memória[0]=0:

zen bot():
do -
(
tela principal();
if (linha==1) medicao(),linha=0;
if (linha==2) ver memoria(),linha=u;
if (linha==3) trm-dados(),linha=0;
if (linha==4) parãme riza(),linha=u;
if (linha==5) afere(),linha=0;
#<r aterc•O:
printf ( cd escreve,"\\fJGURDE!");
delay mo (000):
)while(true):

```

APÊNDICE H-Esquema da placa do circuito

