

PMC

FD-1513

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

MEDICÃO DINÂMICA DE ESFORÇOS E POSIÇÃO DE
CONTATO RODA / TRILHO

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA MECÂNICA

SÃO PAULO, 1992

OK

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600009938

**À RITA
E
VERÔNICA**

AGRADECIMENTOS

AOS COLABORADORES DO INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE
SÃO PAULO - I.P.T.

E DA FERROVIA PAULISTA S.A. - FEPASA

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento, construção e verificação de um sistema para a medição dinâmica dos esforços de contato roda/trilho. Foi feito um levantamento comparando os diversos sistemas usados em vários países, possibilitando o desenvolvimento de um produto adequado às condições brasileiras.

O sistema adotado consiste de duas rodas instrumentadas com pontes de extensômetros elétricos, amplificadores, anéis deslizantes ("slip-rings"), A/D's e um microcomputador PC para armazenagem e pós-processamento dos sinais. Para minimizar os efeitos dos ruídos, os sinais são amplificados por condicionadores montados diretamente nas rodas girantes, portanto, antes de passarem pelos "slip-rings".

Os rodeiros instrumentados foram calibrados, a princípio, estaticamente usando atuadores eletro-hidráulicos da MTS, juntamente com o software desenvolvido. Posteriormente, o sistema completo foi testado na FEPASA (linha Campinas-Jundiaí) e os resultados foram altamente satisfatórios.

1
bugio pag 102

ABSTRACT

The purpose of this project is the development, construction and testing of a system for the measurement of the dynamic contact forces at the wheel/rail interface. A review was made comparing the different systems in use at various countries. This made it possible to develop a new product that is adequate to our conditions.

The adopted system consists of two instrumented wheel with strain-gage bridges, amplifiers, slip-rings, A/D's and a PC type microcomputer for the storage and pos-processing of the signals. To minimize effects of noise, the signals are amplified by conditioners mounted directly on the rotating wheels and, therefore before passing through the slip rings.

The instrumented trucks were calibrated statically using electro-hydraulic actuators made by MTS together with the written software. Then, the complete system was tested in the FEPASA on the Campinas-Jundiaí line and the results were highly satisfactory.

FIGURAS

FIGURA 1.1 - Equilíbrio de um Rodeiro.....	2
FIGURA 1.2 - Vista em Corte do Ponto de Contato Roda/Trilho.....	4
FIGURA 2.1 - Configuração das Pontes para Medição da Carga Lateral (EMD).....	11
FIGURA 2.1.1 - Esquema do Sistema de Calibração(EMD).....	11
FIGURA 2.2 - Configuração das Pontes para Medição da Carga Vertical (EMD).....	12
FIGURA 2.3 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Longitudinal (BR).....	15
FIGURA 2.4 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral(BR).....	16
FIGURA 2.5 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (BR).....	17
FIGURA 2.6 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (AAR).....	20
FIGURA 2.7 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (AAR).....	21
FIGURA 2.8 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (ASEA/SJ).....	25
FIGURA 2.9 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (ASEA/SJ).....	26
FIGURA 2.10 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (IITRI).....	34
FIGURA 2.11 - Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (IITRI).....	35
FIGURA 2.12 - Configuração da Ponte para Medição da Posição (IITRI).....	36
FIGURA 2.13 - Diagrama de Corpo Livre para o Eixo (WYLE).....	39
FIGURA 2.14 - Configuração da Ponte para Medição do Momento no Eixo (WYLE).....	40
FIGURA 3.1 - Configuração das Pontes de Extensômetros para o Sistema Desenvolvido.....	69
FIGURA 3.2 - Extensômetro de Contato.....	71
FIGURA 3.3 - Gráfico ϵ x Raio.....	72

FIGURA 3.4 - Estrutura de Calibração.....	74
FIGURA 3.5 - Esquema do Condicionador (amplificador).....	76
FIGURA 3.6 - Esquema do Condicionador (filtro).....	76

FOTOGRAFIAS

FOTO 1 - Usinagem da Roda.....	103
FOTO 2 - Preparação da Superfície para Colagem do Extensômetro..	103
FOTO 3 - Colagem do Extensômetro.....	104
FOTO 4 - Detalhe dos Extensômetros Colados.....	104
FOTO 5 - Detalhe do Dispositivo de Fixação dos Extensômetros....	105
FOTO 6 - Detalhe do Posicionamento do Dispositivo.....	105
FOTO 7 - Roda dentro do Estufa para Cura da Cola.....	106
FOTO 8 - Detalhe dos Extensômetros depois da Cura da Cola.....	106
FOTO 9 - Detalhe da Proteção dos Extensômetros.....	107
FOTO 10 - Detalhe da Fiação dos Extensômetros.....	107
FOTO 11 - Detalhe da proteção de Alumínio Contra Interferências Eletromagnéticas.....	108
FOTO 12 - Detalhe da Calota de Alumínio para Proteção Mecânica..	108
FOTO 13 - Montagem das Rodas após Instrumentação.....	109
FOTO 14 - Sistema de Calibração (Atuadores e Quadro de Reação)..	109
FOTO 15 - Rodeiro Instrumentado Montado no Carro de Passageiros.	110
FOTO 16 - Vista da Instrumentação dentro do Vagão.....	110

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - IMPORTÂNCIA DA CONSTRUÇÃO DO RODEIRO INSTRUMENTADO..	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES.....	7
2.1 ESTUDO DE ALGUNS SISTEMAS DE RODEIROS INSTRUMENTADOS.....	7
2.1.1 Sistema de alma de roda instrumentada da divisão eletromotiva da General Motors (EMD).....	8
2.1.2 Sistema de roda raiada da Bristish Rail (BR).....	13
2.1.3 Sistema de alma de roda instrumentada da Association of American Railroads (AAR).....	18
2.1.4 Sistema de alma instrumentada das Ferrovias Suecas (ASEA).....	23
2.1.5 Sistema de Roda Instrumentada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Illinois (IITRI).....	27
2.1.6 Sistema de adaptador de mancal (de roda e eixo) instrumentados do Laboratório de Pesquisas de Colorado Springs U.S.A. (WYLE).....	37
2.2 ESPECIFICAÇÕES PARA CONSTRUÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	41
2.2.1 Aplicação.....	41
2.2.2 Requisitos de performance.....	41
2.2.3 Outros requisitos de Performance.....	42
2.2.4 Procedimentos de calibração.....	42
2.2.5 Medições de deslocamentos.....	45
2.2.6 Aprovação.....	45
2.2.7 Tabelas comparativas.....	46
2.2.8 Procedimentos de avaliação.....	46
2.2.9 Fatores de avaliação.....	47
2.2.10 Discussão do fator de avaliação.....	47

2.3 CONCLUSÕES SOBRE OS SISTEMAS DE MEDIÇÕES.....	66
CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE RODEIRO INSTRUMENTADO DESENVOLVIDO.....	67
3.1 ESCOLHA DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO.....	67
3.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA PARTE MECÂNICA.....	68
3.2.1 Tecnologia desenvolvida.....	68
3.2.2 Veículo do primeiro protótipo.....	70
3.2.3 Usinagem da roda.....	70
3.2.4 Definição dos pontos de máxima tensão na alma da roda.	70
3.2.5 Instrumentação da roda.....	73
3.2.6 Condicionamento do sinal.....	75
3.3 DESENVOLVIMENTO DOS INSTRUMENTOS DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE SINAIS.....	77
3.3.1 Aquisição e processamento dos sinais do rodeiro desenvolvido.....	77
3.3.2 Passos para determinação de Y/Q.....	88
3.3.3 Calibração (teste de laboratório).....	91
3.3.4 Ensaio de campo.....	94
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES FINAIS.....	96
CAPÍTULO 5 - PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	98
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
APÊNDICE - DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA DO RODEIRO.....	102

1 - IMPORTÂNCIA DA CONSTRUÇÃO DO RODEIRO INSTRUMENTADO

1.1 INTRODUÇÃO

A eficiência na operação de transporte ferroviário está baseada na redução do tempo de percurso com baixo custo de manutenção por tonelada transportada. A deterioração da malha ferroviária, nas últimas décadas, fez com que a prioridade dos recursos fosse voltada à manutenção das condições existentes, resultando na aplicação de poucos recursos no desenvolvimento de novas tecnologias.

Com base nos trabalhos desenvolvidos com as operadoras do sistema ferroviário nos últimos anos, percebeu-se a necessidade de construir um equipamento que pudesse tanto solucionar problemas de operação e manutenção, como também auxiliar em novos projetos ferroviários. Antes da descrição dessas aplicações, é importante que se caracterize a tecnologia utilizada no projeto.

Há duas maneiras de caracterizar a influência do comportamento dinâmico do veículo nos esforços de interação roda/trilho: uma é usando o modelamento matemático, onde através do estabelecimento das condições de contorno e medição de alguns parâmetros, como deslocamentos relativos e acelerações, determinam-se os esforços; outra é a medição diretamente nas rodas ou eixo que compõe o rodeiro, com instrumentação específica.

As medições são caracterizadas por dois tipos principais de sistemas de instrumentação de rodeiro, para a determinação dos esforços de contacto roda/trilho[1]. Ambos os tipos utilizam extensômetros elétricos para medir tensões em vários pontos do rodeiro, dos quais os esforços são determinados, resultando nos seguintes sistemas:

- 1) Um tipo utiliza os extensômetros para medir o momento de flexão em duas posições no eixo e os esforços verticais, que passam pelos mancais. Os esforços laterais e verticais que agem na interface roda/trilho, são deduzidos dessas medições.
- 2) O outro utiliza pontes de extensômetros montadas sobre a roda e essas medições são usadas na dedução dos esforços.

O sistema de roda instrumentada (2) tem a capacidade de fazer medições mais exatas, porque mede os esforços junto à interface roda/trilho. Com isso existe menor efeito de atenuação dinâmica de massa, além do que, instrumentando a roda obtém-se também a posição lateral de contato roda/trilho. Porém, o tipo (1) também é utilizado em alguns casos, devido a maior facilidade no posicionamento dos sensores e ser menos suscetível a interferências devido a variações de temperatura na roda.

A segurança, durante o movimento de um veículo ferroviário depende, essencialmente, dos esforços transversais e verticais transmitidos por um eixo à via nos pontos de contato roda/trilho [2]. A figura 1.1 caracteriza estes esforços, a terminologia é da ORE (Escritório de Pesquisas e Ensaio da União Internacional de Estradas de Ferro).

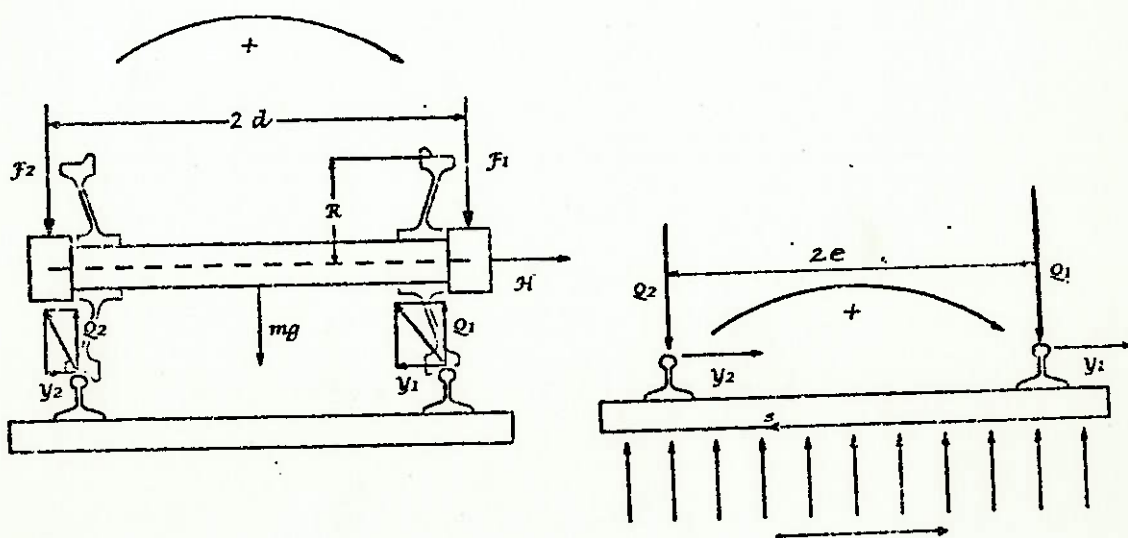


Figura 1.1: Equilíbrio de um Rodeiro (duas rodas e um eixo)

F1 F2 H	Forças verticais e transversal no eixo.
Q1 Q2 Y1 Y2	Forças verticais e transversais nos pontos de contato roda/trilho.
m*g	Peso do eixo.
2d	Distância transversal entre as forças de suspensão.
2e	Distância transversal entre pontos de contato.
R	Raio das rodas.
S	Resistência transversal da via.

A relação instantânea dos valores de Y e Q, por exemplo, caracteriza a segurança de uma roda (roda diretriz na curva) em relação ao trilho. Para que a segurança de um veículo seja total é necessário que as outras rodas não rodem completamente descarregadas.

Os esforços transversais são, a qualquer instante, iguais à soma vetorial das forças geradas pelo movimento da caixa e dos rodeiros. Os esforços nos pontos de contato roda/trilho são pequenos quando o veículo está em movimento estável numa reta; por outro lado, quando o movimento torna-se instável, os esforços podem atingir valores críticos (para efeito de descarrilamento).

Em curva, a componente contínua da força centrífuga não compensada é freqüentemente preponderante. As variações de cargas verticais são, sobretudo, provocadas pelos movimentos de balanço devido aos defeitos de nivelamento, alinhamento e a inclinação da via.

A mais simples equação para se obter o valor crítico da relação Y/Q foi aquela desenvolvida por NADAL [3], em 1908. Ela foi baseada na simples analogia de um bloco deslizando para baixo, em um plano inclinado. Tem-se que (figura 1.2):

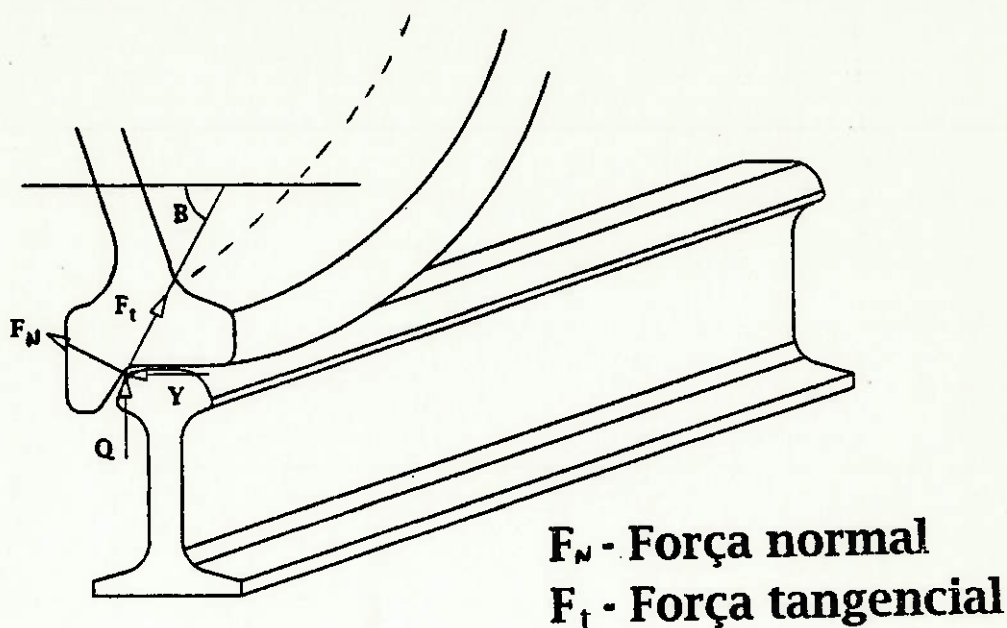


Figura 1.2: Vista em Corte do Ponto de Contato Roda/Trilho

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{[(F_n \operatorname{sen} \beta) - (F_n \mu \operatorname{cos} \beta)]}{[(F_n \operatorname{cos} \beta) + (F_n \mu \operatorname{sen} \beta)]} \quad (1.1)$$

$$\frac{Y}{Q} \leq \frac{(\operatorname{tg} \beta - \mu)}{(1 + \mu \operatorname{tg} \beta)} \quad (1.2)$$

onde: β = ângulo do flange da roda

μ = coeficiente de atrito entre a face de bitola do trilho e o flange da roda.

A norma americana da AAR admite como valor operacional máximo, um Y/Q de 0,8.

A importância da medição da posição lateral do contato roda/trilho, está na medição do "hunting" (instabilidade lateral), que está relacionado com a velocidade a partir da qual existe uma transição do sistema de estável para instável.

A seguir, descreve-se melhor algumas aplicações em função das características descritas acima:

No que se refere à operação, o rodeiro instrumentado é usado para determinar a velocidade máxima de segurança ao descarrilamento, com isso pode-se otimizar o tempo de percurso, aumentando a velocidade média com segurança.

Na manutenção do material rodante e via permanente, o equipamento auxilia tanto na caracterização do comportamento dinâmico do veículo, detectando aí possíveis falhas, como também na avaliação dos pontos críticos da via. Com isso pode-se programar uma manutenção preventiva dirigida, diminuindo os custos e as possibilidades de acidente.

No que concerne à área de projetos, o rodeiro instrumentado auxilia na definição de parâmetros que levam a construção de veículos e via permanente adequados às condições do país. Os dados levantados sobre a solicitação na via fornecem subsídios também ao projeto de novos traçados, que possibilitam adequar melhor o material rodante já existente.

Em vista do exposto, resolvi, desenvolver a dissertação de Mestrado junto ao Departamento de Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com o apoio do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.) e baseado na construção de um equipamento que pudesse medir dinamicamente os esforços e posição de contato roda/trilho, denominado Rodeiro Instrumentado. Esse equipamento é composto de sensores posicionados nas duas rodas e sistemas de transmissão, amplificação, condicionamento e processamento dos sinais.

Nesse primeiro capítulo será caracterizada a importância do desenvolvimento do Rodeiro Instrumentado. No segundo capítulo, serão descritos alguns sistemas existentes, especificações para calibração, utilização e avaliação. O terceiro capítulo falará sobre o sistema escolhido, abordando: projeto, construção, calibração, ensaios no campo e conclusões finais.

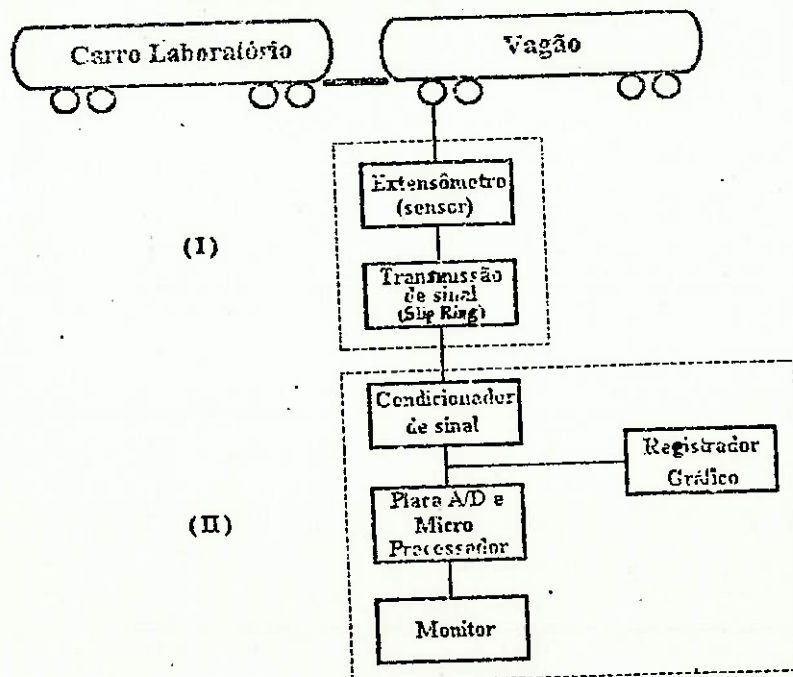
Portanto, em resumo, o objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento de medição que produza uma tecnologia que leve em consideração os pontos positivos e negativos de alguns dos modelos existentes, tomando como premissa básica a adequação, às nossas condições, tanto no que se refere a utilização do produto acabado como na especificação dos materiais necessários a construção dos sistemas de transdução, amplificação, transmissão, condicionamento e tratamento (software e hardware) do sinal, que atenda as necessidades das operadoras do sistema ferroviário a curto prazo, principalmente no que se refere à determinação das velocidades críticas para efeito de descarrilamento.

2 - ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES

2.1 ESTUDO DE ALGUNS SISTEMAS DE RODEIROS INSTRUMENTADOS

Neste item serão descritas as características básicas de alguns sistemas de medição com suas calibrações específicas. Os dados de calibração são usados para definir a relação entre as forças que agem através da área de contato e os sinais de saída das pontes de medição da força individual. As características de saída da ponte derivadas desses testes são: sensibilidade primária, linearidade, histerese, interferência e a influência da posição do carregamento. São usados testes de calibração estática para obter essas características. A maioria dos sistemas é composta, basicamente, de sensores (extensômetros) colados ou soldados na roda ou eixo ferroviário, amplificador de sinais, "slip ring" (anel deslizante) para transmissão dos sinais do rodeiro ao interior do veículo, condicionador de sinais, placa A/D e Hardware/Software para o seu tratamento, como mostrado no fluxograma a seguir.

FLUXOGRAMA INSTRUMENTAÇÃO DO RODEIRO



(I) Posicionado no Rodeiro; (II) Dentro do carro laboratório

O posicionamento dos extensômetros é estabelecido através de cálculos das tensões por elementos finitos ou dados experimentais, obtidos através de extensômetros posicionados na alma da roda e simulação das carga em laboratório.

Há dois tipos de pontes:

- 1) Saída Alternada: O sinal da ponte tem valor máximo ou mínimo em função da revolução da roda.
- 2) Saída Constante: A configuração da ponte permite que seu sinal seja constante em relação a revolução da roda.

A maioria dos modelos de rodeiro instrumentado utiliza amplificadores elétricos volumosos para os sinais provenientes dos sensores; em razão disso, os sinais são amplificados após a passagem através dos "slip rings". Isto acarreta a introdução de ruídos, pois só alguns milivolts são transmitidos através destes anéis.

2.1.1 Sistema de alma de roda instrumentada da Divisão Eletromotiva (EMD) da General Motors[11].

Esse sistema usa extensômetros aplicados à alma da roda para medir cargas lateral e vertical na interface roda/trilho. O estudo para a determinação do posicionamento dos sensores é feito com aplicação de extensômetros de 1,60mm (1/16in) orientados radialmente em ambos os lados da roda, onde são espaçados em 6,40mm (1/4in). A saída de cada extensômetro é configurada para registrar as cargas vertical e lateral com incremento de 44,48 kN (10000 lb). As tensões nas rodas são gravadas com incrementos de 7,5 graus, através da revolução da mesma. Pelos valores de saída dos sinais dos extensômetros, relacionados com a posição radial dos mesmos, determina-se o posicionamento ótimo dos extensômetros para se ter o mínimo "efeito cruzado" (interferência da carga vertical na ponte lateral e vice-versa) no circuito da ponte.

O trabalho desenvolvido pela EMD indicou que a configuração adequada dos extensômetros na ponte de Wheatstone e a influência da deformação simétrica na roda, poderiam ser amenizadas por cancelamento, e a saída poderia desenvolver-se proporcional a carga lateral aplicada.

A seguir será mostrada a distribuição das pontes de extensômetros, com as figuras correspondentes contendo o posicionamento dos extensômetros, a configuração das pontes de Wheatstone e os sinais de saída do sistema EMD.

2.1.1.1 Medição da carga lateral

São usadas duas pontes de extensômetros espaçadas de 45 graus, aplicadas na face interna da roda. A intensidade da força é proporcional à amplitude do sinal de saída. As pontes estão defasadas de 90 graus; denomina-se por pontes senoidal e cossenoidal (Figuras 2.1a, 2.1b e 2.1c).

$$|L_a| = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2)} \quad (2.1)$$

onde: L_a = carga lateral da roda

L_1 e L_2 = sinal individual da ponte

2.1.1.2 Medição da carga vertical

Usa duas pontes, aplicadas na face externa da roda. A configuração das duas pontes está mostrada nas Figuras 2.2a e 2.2b. Os sinais senoidais das duas pontes estão mostrados na Figura 2.2c.

Para calibração a EMD usa uma instalação de teste, onde o rodeiro é colocado sobre trilhos espaçados de forma que tenham uma folga (lateral) de via de 32mm. Figura 2.1.1 a seguir:

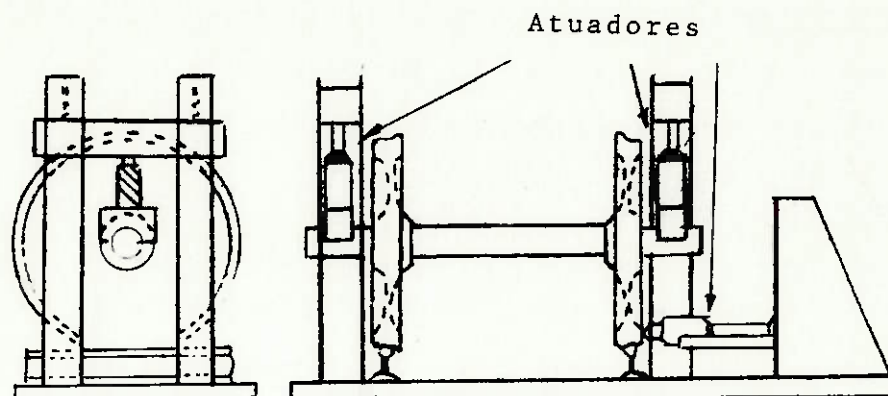


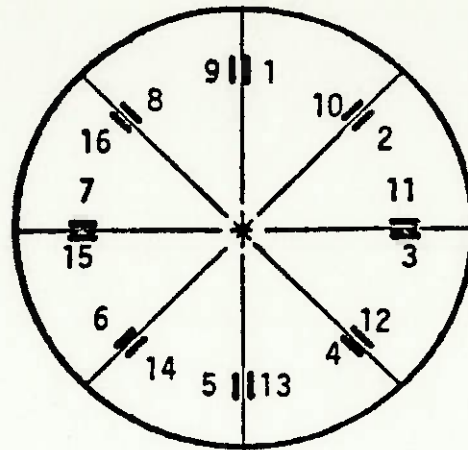
Figura 2.1.1: Esquema do sistema de calibração(EMD)

Os carregamentos vertical e lateral são aplicados separadamente por atuadores hidráulicos e os dados são gravados a intervalos de rotação de 7,5 graus.

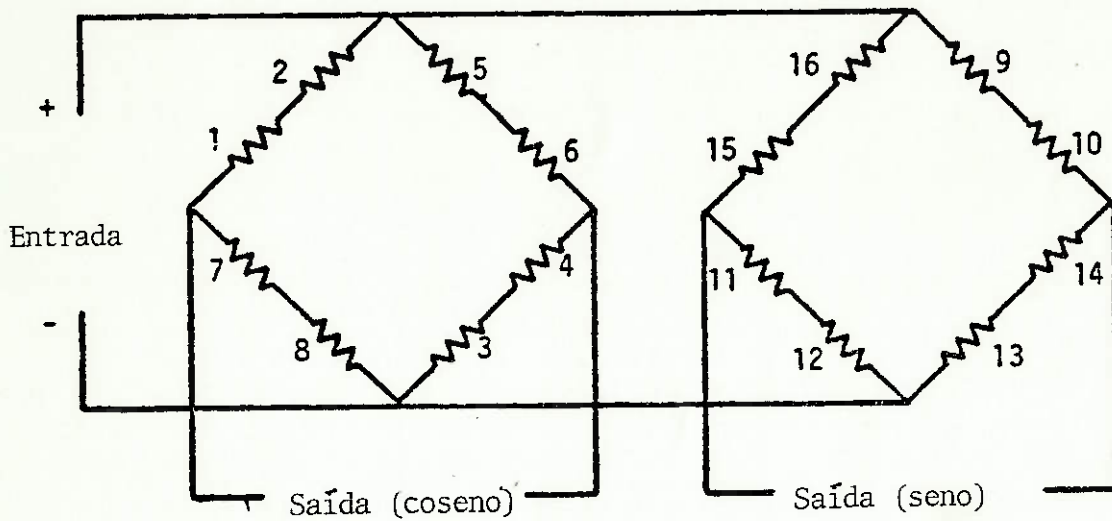
Os carregamentos verticais são aplicados nas mangas do eixo em incrementos de 44 kN até um máximo de 180 kN.

O rodeiro é carregado em três posições: com a roda flangiando o trilho esquerdo, com a roda centrada entre os trilhos, com a roda flangiando o trilho direito.

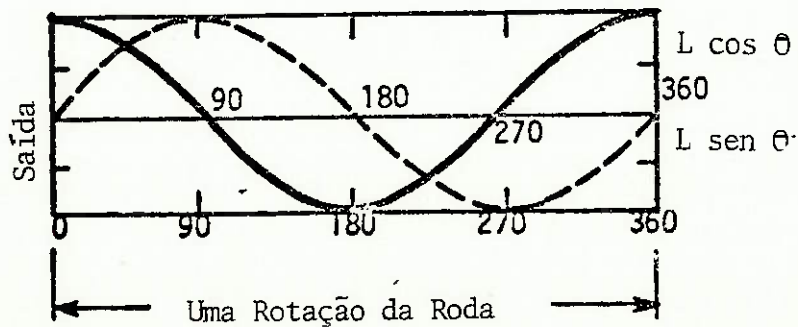
Nos testes de carregamento lateral, carregamentos verticais são impostos a cada extremidade do eixo de maneira que o carregamento vertical na roda flangiada seja de 130 kN e aproximadamente 0 kN na roda não flangiada. Isto é feito para reduzir a influência do carregamento vertical na calibração do carregamento lateral. Os carregamentos laterais são aplicados na borda do lado de fora da roda em incrementos de 4,4 kN até um carregamento máximo de 180 kN. A seguir serão mostradas as configurações das pontes de extensômetro para o sistema da EMD de roda instrumentada.



(a) Posição dos Extensômetros
Lado Externo da Roda

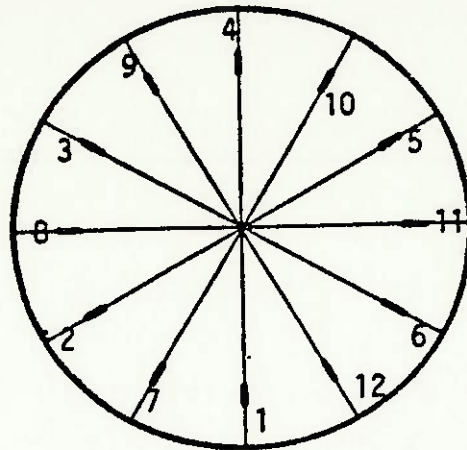


(b) Configuração da Ponte

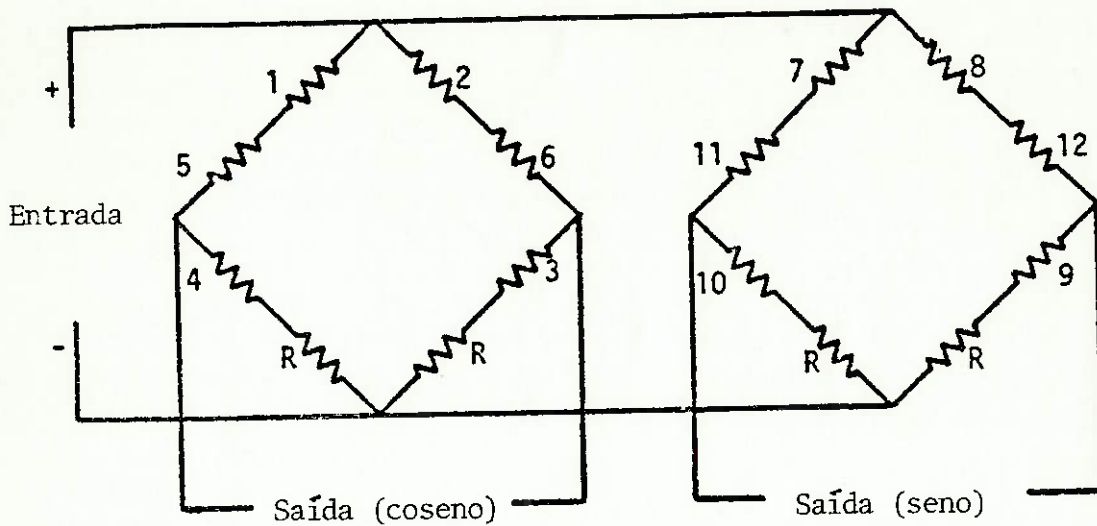


(c) Final da Saída

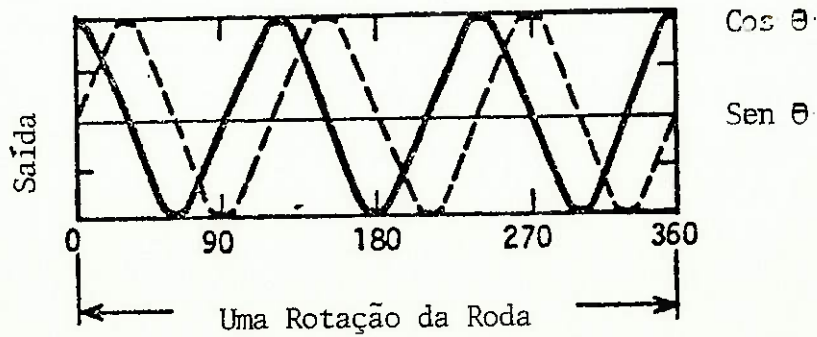
Figura 2.1: Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (EMD)



(a) Posição dos Extensômetros Lado Externo da Roda



(b) Configuração da Ponte



(c) Sinal de Saída

Figura 2.2: Configuração da Ponte para Medição Vertical (EMD)

2.1.2 Sistema de roda raiada da BR (British Railroads) [5].

O sistema BR utiliza pontes de extensômetros aplicadas a uma roda com doze raios para medição de cargas lateral, vertical e longitudinal na interface roda/trilho. O posicionamento dos extensômetros é determinado, como na maioria dos rodeiros instrumentados, através de um estudo de distribuição de tensões por elementos finitos (modelagem matemática).

2.1.2.1 Medição da carga longitudinal

A ponte de extensômetro longitudinal é configurada para ser sensível ao par de forças que tendem a girar a roda. Para isso mede-se as tensões de flexão próximas ao cubo da roda (Figura 2.3a).

2.1.2.2 Medição da carga lateral

A carga lateral é determinada pela medição dos momentos de flexão no raio. Um momento é medido próximo ao cubo (M1) e um outro próximo ao aro (M2). Chega-se ao valor da força lateral através da equação (Figura 2.4a):

$$M2 - M1 = L (X2 - X1) \quad (2.2)$$

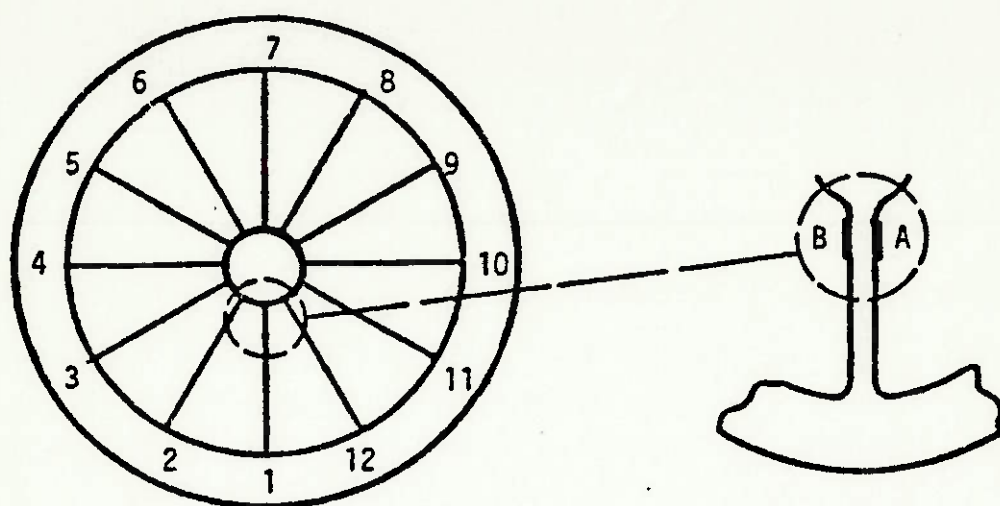
onde: L = esforço lateral
 X1 = distância de L ao extensômetro próximo ao cubo da roda
 X2 = distância de L ao extensômetro próximo ao aro da roda

2.1.2.3 Medição da carga vertical

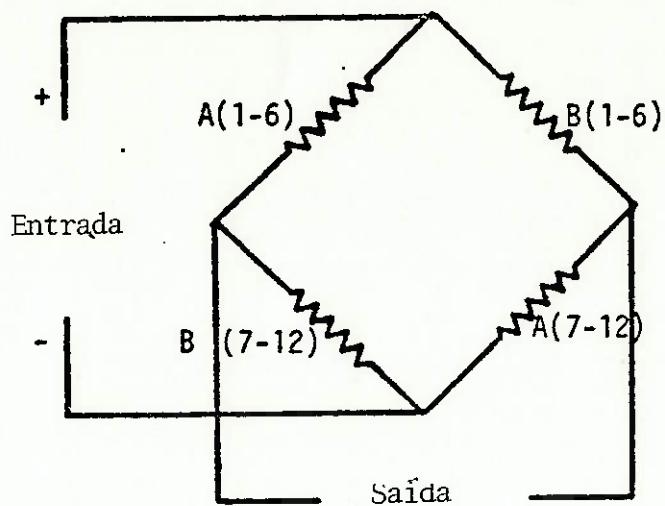
A localização dos extensômetros para a medição da carga vertical está sobre ambos os lados da roda, no eixo neutro em relação aos efeitos de força lateral e numa distância radial onde tensões de forças longitudinais são minimizadas no circuito da ponte (Figura 2.5a). O método usado para gerar o sinal de carga vertical é a soma

das saídas dos pares de extensômetros em meia roda e opor isso à saída dos extensômetros restantes como mostrado na Figura 2.5b. Essa técnica fornece uma forma de onda cíclica reversa para a saída da ponte durante a rotação da roda.

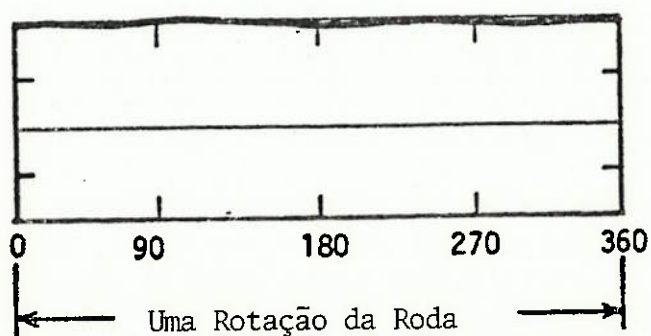
A BR usa uma aparelhagem de calibração que é capaz de aplicar força em três direções. As forças verticais são aplicadas por vigas pivotadas (giram em torno de um eixo) a pequenos suportes, que representam os trilhos. Estes suportes são montados sobre mancais lineares para permitir o movimento no plano horizontal, o que evita forças laterais. Uma força longitudinal pode ser sobreposta à força vertical por um outro atuador hidráulico que empurra o suporte. Esta força deve ser reagida pelo suporte na outra roda. Os carregamentos laterais podem ser aplicados na extremidade da borda. As forças laterais podem ser sobrepostas ao carregamento vertical ou aplicadas independentemente. As forças de calibração são aplicadas a intervalos de rotação de 10 graus. Estes intervalos são determinados em função da precisão que se deseja na calibração, ou seja, quanto menor o ângulo, maior o número de pontos.



(a) Posição dos Extensômetros nos Raios



(b) Configuração da Ponte



(c) Sinal de Saída

Figura 2.3: Configuração da Ponte para Medição da Carga Longitudinal (BR)

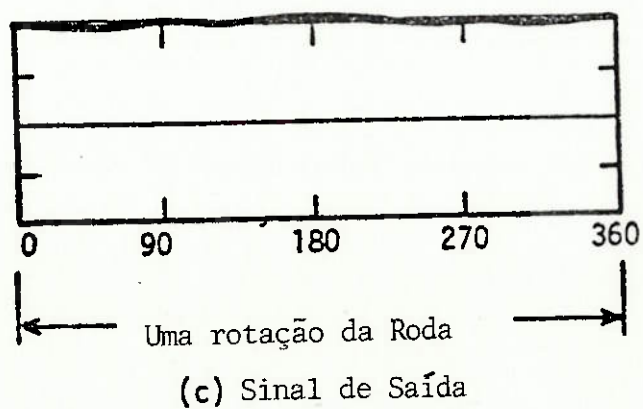
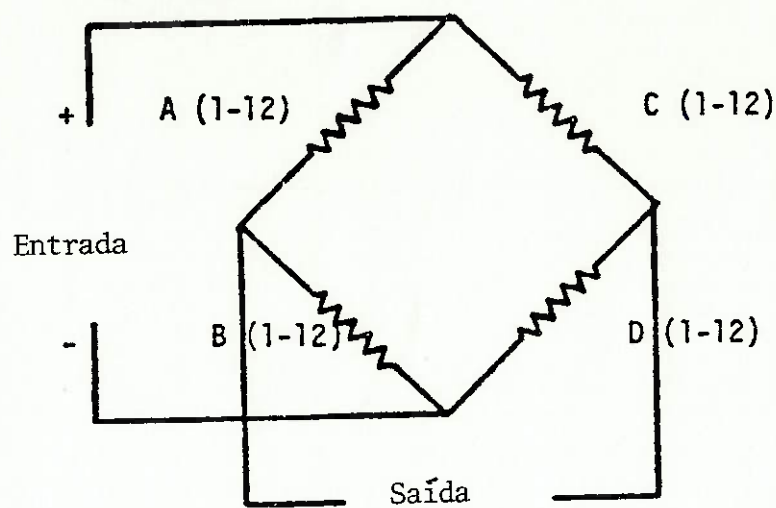
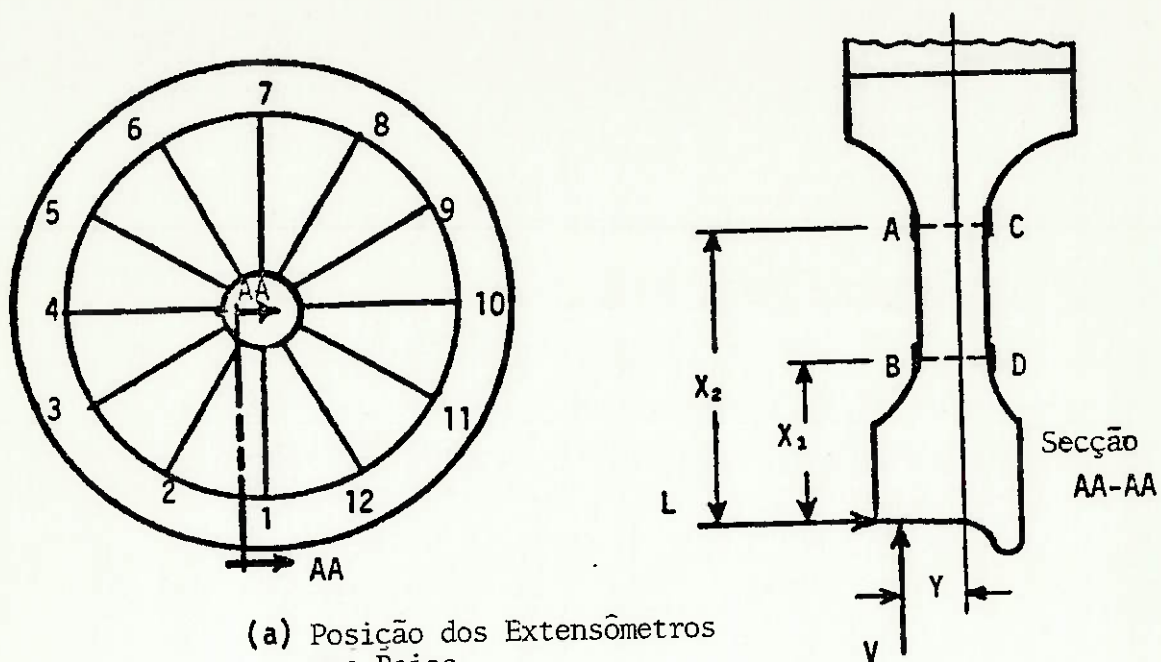
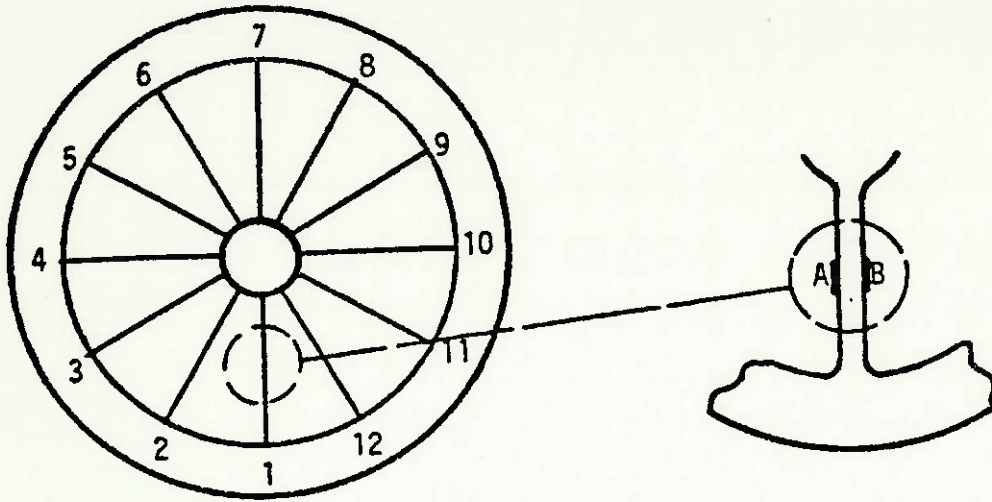
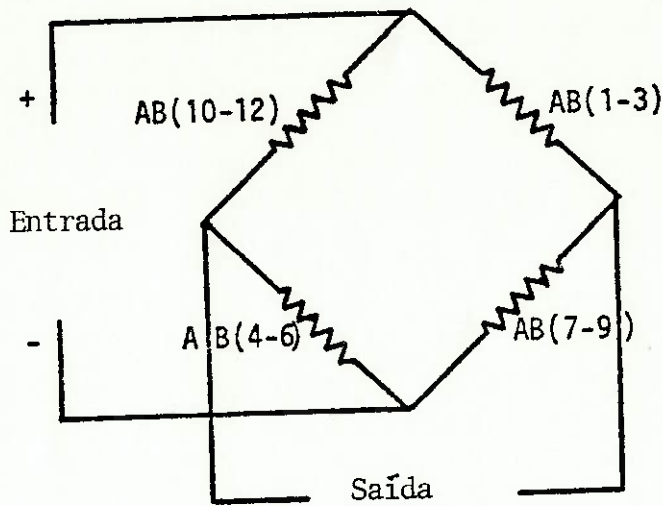


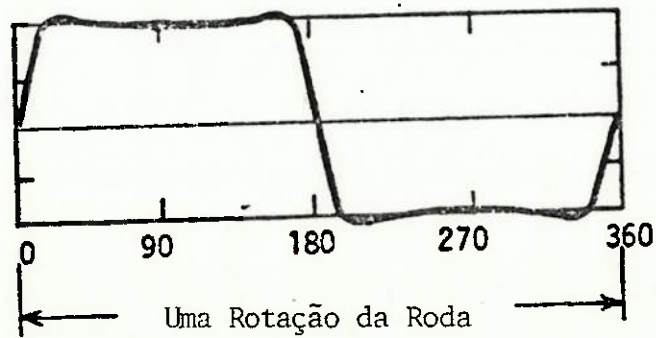
Figura 2.4: Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (BR)



(a) Posição dos Extensômetros no Raio



(b) Configuração da Ponte



(c) Sinal de Saída

Figura 2.5: Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (BR)

2.1.3 Sistema AAR (Association of American Railroads) de alma de roda instrumentada[6].

O sistema AAR usa extensômetros aplicados no lado externo da alma da roda para medição das cargas roda/trilho, vertical e lateral.

2.1.3.1 Medição da carga lateral

Uma ponte contendo doze extensômetros ativos aplicados na superfície externa da alma da roda é usada para medir as cargas laterais. Os extensômetros são posicionados em duas linhas circunferenciais com um espaçamento angular de 60 graus, como mostrado na Figura 2.6a. Três extensômetros adjacentes numa mesma circunferência são ligados em cada perna da ponte. Os extensômetros externos são aditivos na ponte e eles se opõem aos conjuntos de extensômetros internos (Figura 2.6b). Essa configuração de ponte dará saída de tensões superficiais assimétricas tais como aquelas devidas à força centrífuga e aos efeitos de aquecimento do aro.

2.1.3.2 Medição da carga vertical

A ponte de carga vertical consiste de quatro extensômetros localizados numa linha diametral na superfície externa da alma da roda. Os dois conjuntos de extensômetros em cada ponte são espaçados em 180 graus (Figura 2.7a). A distância radial dos extensômetros foi selecionada para minimizar a influência da carga lateral e fornecer máxima sensibilidade às cargas verticais. O uso de duas pontes, afastadas de 90 graus, fornece quatro medições de carga vertical, sendo dois de sinais opostos, por rotação da roda (Figura 2.7a).

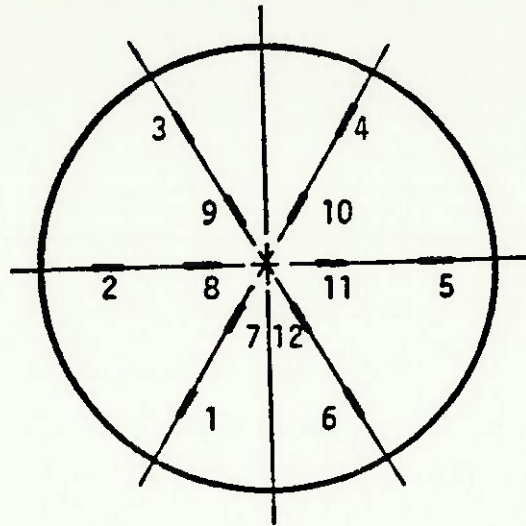
O equipamento de calibração da AAR aplica os carregamentos sobre dois trilhos de 60 kg, 3,05 m de comprimento, localizados sobre quatro dormentes de madeira de 180mm x 230mm x 2,6m.

Duas barras de 38mm x 3,05m espaçadas de 1,83m localizadas logo abaixo da cabeça do trilho são usadas para aplicar carregamento lateral por compressão dos trilhos contra as flanges das rodas. Esse carregamento é desenvolvido por dois pistões hidráulicos de capacidade de 440 kN. Dois pistões hidráulicos de 440 kN são usados para aplicar os carregamentos verticais.

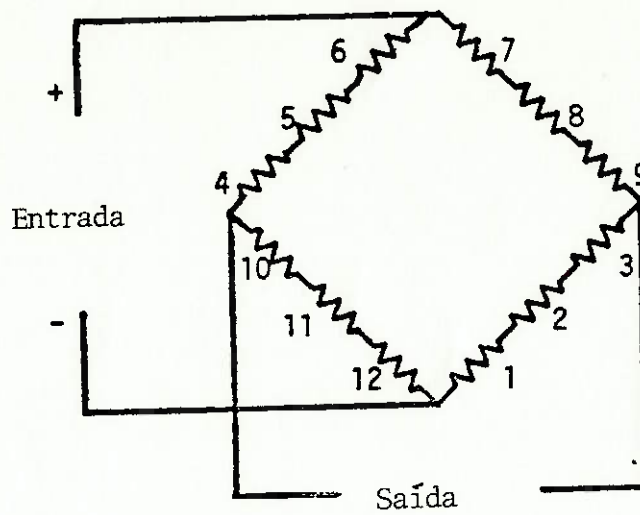
Os carregamentos de calibração são aplicados a um "truck" completamente montado. Antes da calibração, o "truck" é submetido a 20.000 carregamentos cíclicos numa faixa de carregamento de 89 a 700 kN, para verificar se há falhas no equipamento.

Ambos os carregamentos de calibração vertical e lateral são aplicados em incrementos de 22 kN a cada rotação de 30 graus da roda.

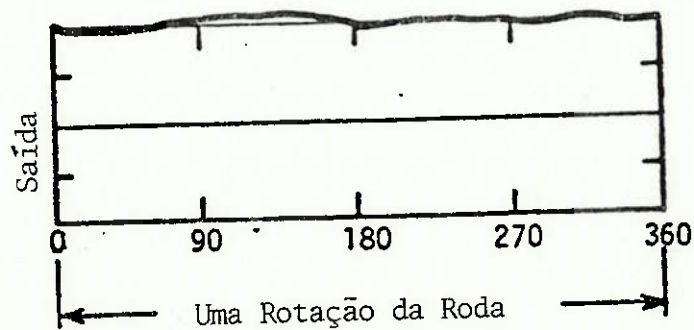
Os carregamentos verticais são aplicados na "tape line" (linha de referência na banda de rodagem da roda) e a 44 mm de afastamento dela, para se avaliar a influência da posição do carregamento.



(a) Posição dos Extensômetros no Lado Externo da Roda

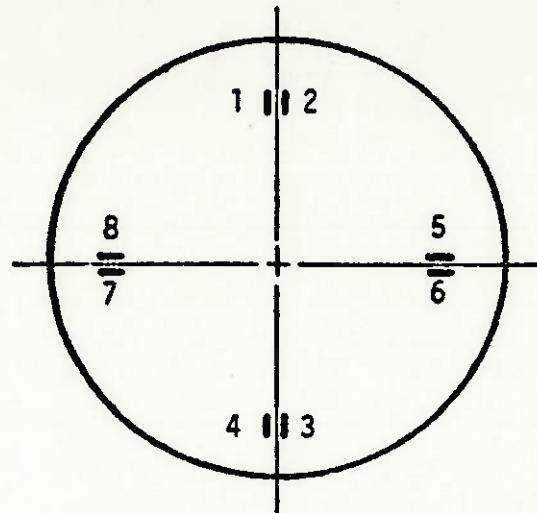


(b) Configuração da Ponte

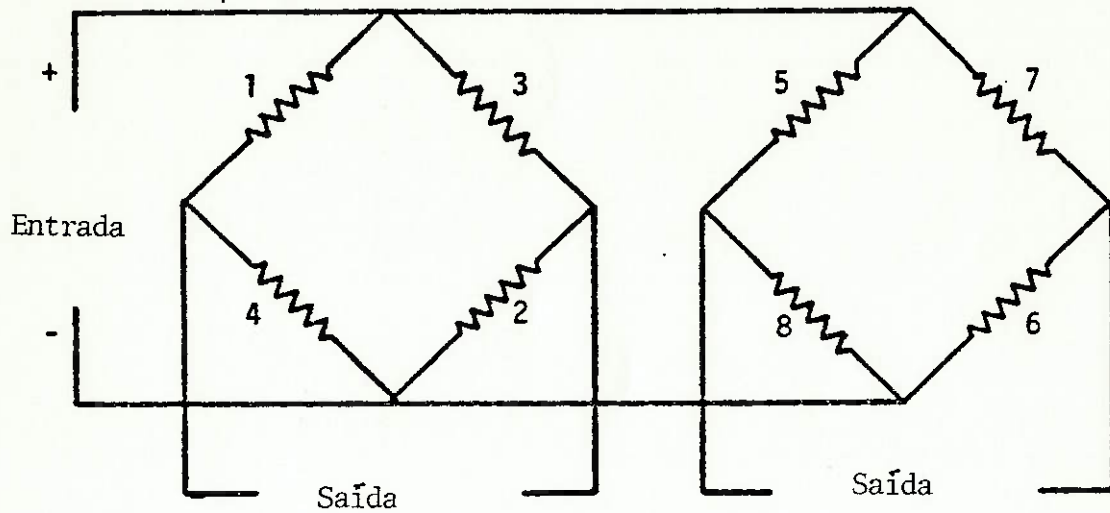


(c) Sinal de Saída

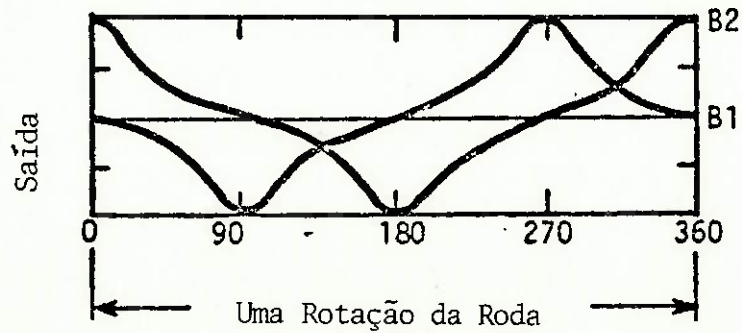
Figura 2.6: Configuração da Ponte para Medição da carga Lateral (AAR)



(a) Posição dos Extensômetros do Lado Externo da Roda



(b) Configuração da Ponte



(c) Ponte de Saída

Figura 2.7: Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (AAR)

Os carregamentos são aplicados em incrementos de 44 kN nesses testes. Adicionalmente à calibração estática, cada rodeiro gira descarregado a uma velocidade equivalente a 122 km/h para avaliação da influência da força centrífuga.

2.1.4 Sistema de alma de roda instrumentada da Ferrovia Sueca (ASEA/SJ) [7].

O sistema ASEA/SJ usa extensômetros aplicados às superfícies interna e externa da alma da roda para a medição das cargas roda/trilho, vertical e lateral.

2.1.4.1 Medição da carga lateral

A ponte lateral contém doze extensômetros ativos, seis aplicados a cada lado da alma da roda. Os extensômetros são espaçados em intervalos de 60 graus, em duas circunferências diferentes, nos lados interno e externo da alma (Figura 2.8a).

Os extensômetros, no lado interno da alma, são aditivos no circuito da ponte e opostos àqueles no lado externo da alma da roda (Figura 2.8b). A interferência da carga vertical e sua posição lateral são consideradas desprezíveis.

2.1.4.2 Medição da carga lateral

São utilizadas duas pontes de carga vertical. Cada ponte consiste de oito extensômetros, quatro aplicados a cada lado da alma. Os extensômetros em cada ponte são espaçados de 90 graus e se localizam sobre duas circunferências em cada lado da alma (Figura 2.9a). As duas pontes verticais são posicionadas 45 graus afastadas. Cada ponte fornece dois ciclos de sinal de saída por revolução da roda. O sinal da ponte de carga vertical diminui rapidamente, enquanto a linha do extensômetro gira para longe de uma orientação vertical. O uso de duas pontes fornece oito picos de sinal de saída vertical, sendo quatro de sinais opostos, por revolução da roda.

A ASEA/SJ possui equipamentos de calibração com instalações de testes estático e dinâmico. A instalação de calibração estática utiliza dois trilhos curtos para aplicar o carregamento no rodeiro.

Um trilho é montado com quatro pinos instrumentados. Esses pinos medem forças verticais e laterais, independentemente.

A força vertical é medida com uma precisão de 1,0 % na faixa de 10 a 100 kN. As forças laterais são medidas com uma precisão de 1,5 % na faixa de 10 a 50 kN.

As forças verticais são aplicadas por pistões hidráulicos entre a instalação e as caixas de manga de eixo.

As forças laterais são aplicadas por pistões hidráulicos entre a instalação e a borda da roda. O rodeiro é impelido por um motor elétrico na instalação de calibração dinâmica. A velocidade máxima equivalente, sem carregamento, é de 120 km/h.

As forças vertical e lateral são aplicadas por um par de rolos em cada roda. Os rolos atuam através de pistões hidráulicos. As faixas de força aplicada são de 0 a 150 kN, e 0 a 200 kN para as forças lateral e vertical, respectivamente.

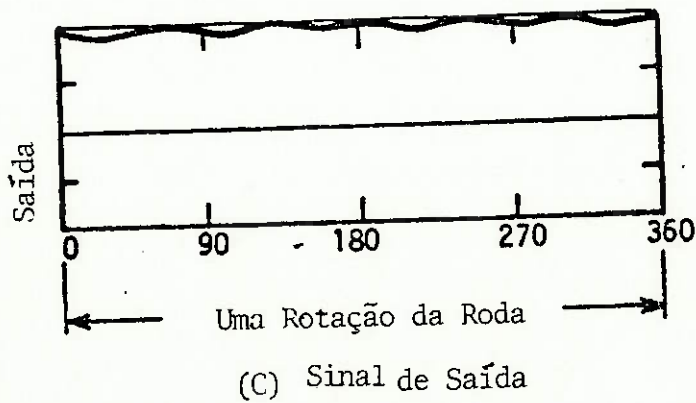
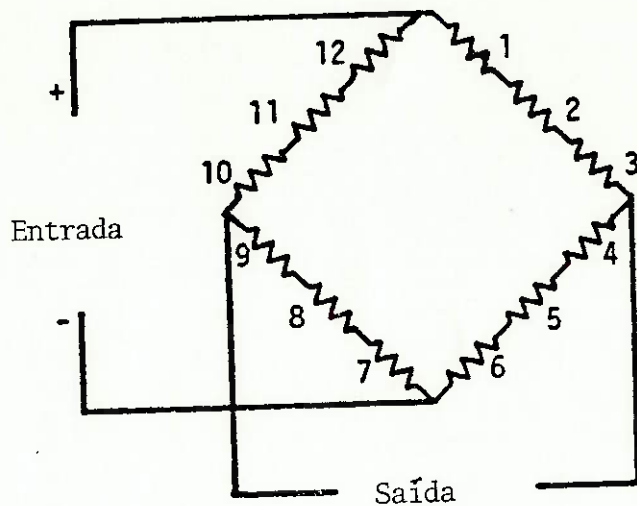
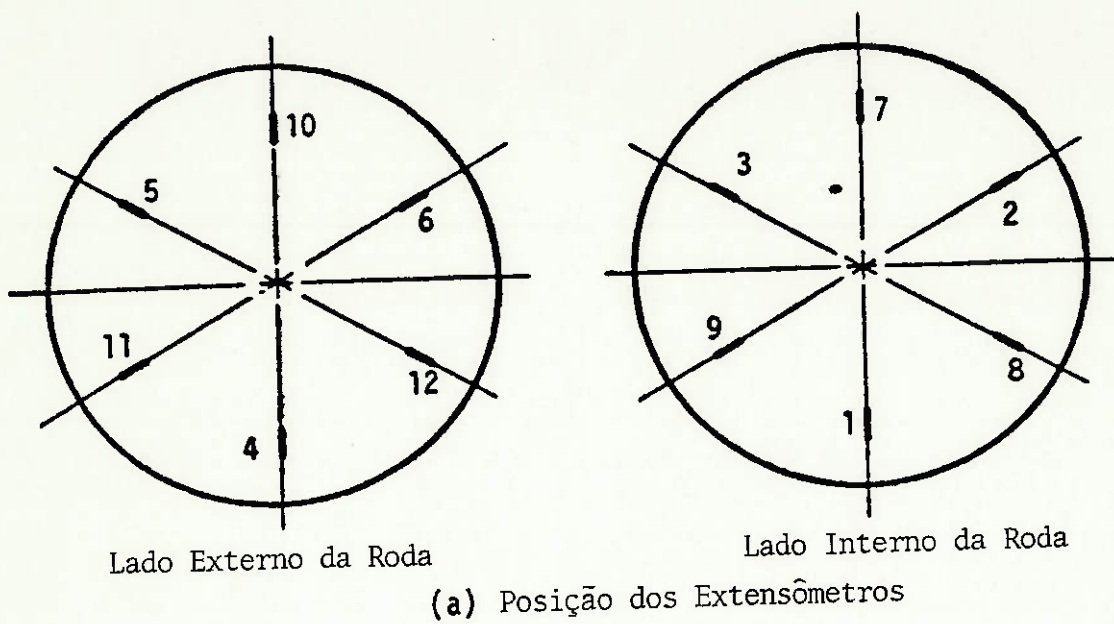
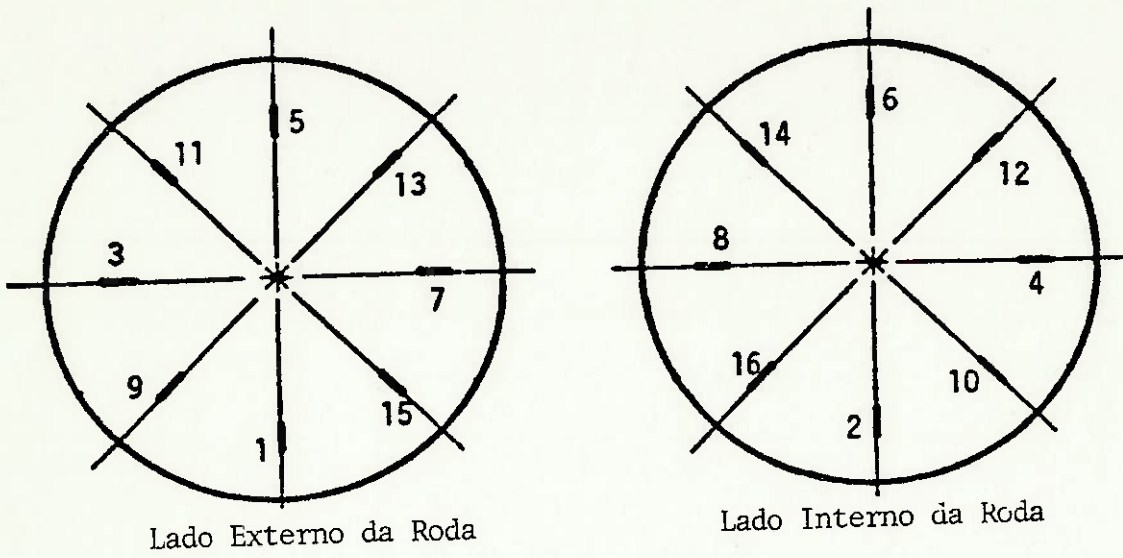
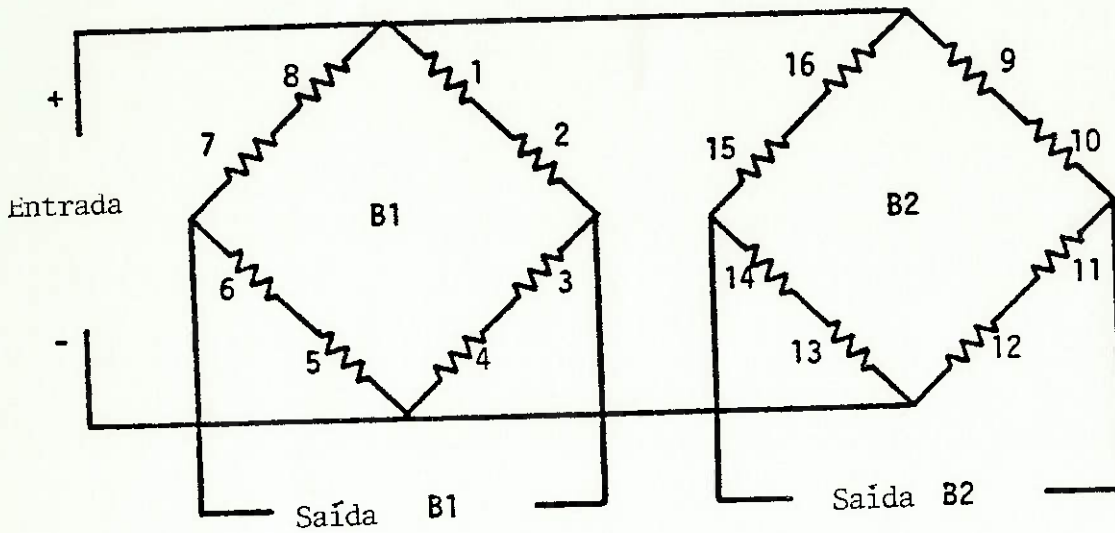


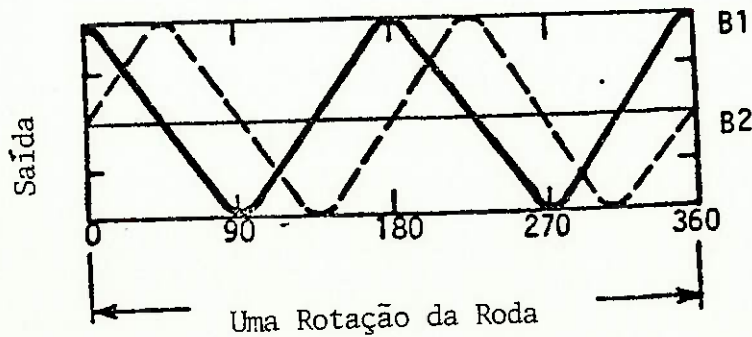
Figura 2.8: Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (ASEA/SJ)



(a) Posição dos Extensômetros



(b) Configuração da Ponte



(c) Sinal de Saída

Figura 2.9: Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (ASEA/SJ)

2.1.5 Sistema de roda instrumentada do Instituto de Pesquisas Tecnologias de Illinois (IITRI) [7].

O sistema IITRI utilizou rodas com diâmetro de 36" (914mm), feitas de aço forjado.

A roda de aço forjado foi escolhida para essa aplicação, porque a seção estreita da alma nos seus anéis mais externos é excelente localização para captar as cargas verticais.

2.1.5.1 Medição da carga lateral

Cada uma das pontes laterais possui oito extensômetros, sendo dois extensômetros em cada braço de uma ponte convencional de quatro braços.

A localização dos extensômetros e a configuração da ponte estão mostrados nas figuras 10a e 10b. Todos os extensômetros são aplicados à superfície interior da alma. Quatro extensômetros ficam próximos a cada extremidade de uma linha diametral.

Todos os extensômetros são orientados na direção radial. Cada ponte é usada para captar a carga lateral dentro de setores de 90 graus que ficam afastados de 180 graus.

Os extensômetros são instalados para serem aditivos na ponte dentro de cada setor de 90 graus. Os extensômetros são montados num diâmetro no lado interior da alma onde existe uma mínima interação com a carga vertical. Entretanto, existe alguma interferência entre a posição da carga vertical sobre a pista e o sinal de saída das pontes laterais. A correção é feita durante o processamento dos dados.

Como será explicado em parágrafo ulterior, a saída da ponte de posição é usada para se determinar a localização da linha de ação da carga vertical.

O conhecimento da localização da carga vertical, e de sua intensidade, faz com que a saída da carga lateral seja correta. A função de relação para essa correção é achada a partir dos dados de calibração da roda. A saída da ponte é máxima quando o ponto de carga está sobre o eixo de simetria da ponte.

Cargas laterais, em outras orientações, podem ser determinadas por um processamento adicional dos dados.

A saída da ponte lateral oscila uma vez para cada giro da roda, com valores absolutos iguais dos sinais positivo e negativo para uma carga lateral constante (Figura 2.10c).

As tensões de superfície assimétricas, tais como aquelas causadas pela força centrífuga e efeitos de aquecimento da borda da roda, são canceladas por esse arranjo de ponte.

2.1.5.2 Medição da carga vertical

Cada uma das três pontes verticais consiste de doze extensômetros, com três extensômetros por perna de ponte, sendo a de extensômetros convencional, de quatro braços ativos. A localização dos extensômetros e sua respectiva ponte, está representada nas Figuras 2.11a e 2.11b.

São aplicados seis extensômetros, em cada lado da alma da roda, três próximos a cada extremidade de uma linha diametral.

Todos os extensômetros, são orientados na direção radial. Cada ponte é usada para sentir carga vertical dentro de dois setores de 60 graus que são centrados separados de 180 graus.

Os extensômetros, em lados opostos da alma, são aditivos na ponte. Um resistor de sensibilidade, R , é adicionado a cada perna da ponte que tem os extensômetros no lado de dentro da alma (Figura

2.11b) para minimizar a variação da sensibilidade da saída da ponte devido a variações na posição lateral da carga vertical.

A saída da ponte é máxima quando o ponto de carga está sobre o eixo de simetria (dos setores).

As cargas verticais, em outras orientações, podem ser estabelecidas por um processamento adicional dos dados.

A saída da ponte vertical oscila uma vez para cada rotação da roda. Os valores absolutos dos sinais de saída positivo e negativo, são iguais para uma mesma carga vertical, como mostrado na Figura 2.11c.

Efeitos secundários de tensão de roda assimétricos são cancelados com esse arranjo de ponte.

2.1.5.3 Medição da posição

A ponte de posição usa oito extensômetros, com dois extensômetros em cada perna de ponte, sendo a de extensômetros convencional, de quatro braços ativos.

A localização dos extensômetros e a configuração da ponte, estão mostradas nas Figuras 12a e 12b. Os extensômetros são aplicados num anel da alma. Os dois extensômetros de cada perna da ponte ficam próximos das linhas de extensômetro e afastados de 90 graus. A ponte fornece uma resposta máxima a cada rotação de 90 graus da roda.

Quando o ponto de contato roda-trilho está alinhado a uma das linhas do extensômetro, o que fornece o sinal de saída da ponte são os extensômetros nas posições 0 e 180 graus.

Os extensômetros nas posições 90 e 270 graus fornecem sinais de saída pequenos, que se cancelam. A ponte fornece sinais de saída,

úteis, apenas em pequenas regiões próximas das linhas dos extensômetros. Nessas regiões a saída da ponte varia quando a carga vertical muda de posição sobre a pista.

O sinal da ponte de posição (Figura 2.12c), quando combinado com os outros dois sinais de ponte (lateral e vertical), informa a posição da linha de ação da carga vertical

A instalação de teste de calibração da IITRI consiste de dois suportes de manga de eixo e estrutura de reação vertical instalados sobre uma placa de base de aço.

A instalação de carga vertical consiste de um cilindro hidráulico e uma célula de carga. A célula de carga é fixada a um bloco de carga que tem uma superfície arredondada, na face de contato, para simular a zona de contato roda/trilho.

A carga é aplicada entre a estrutura de reação e o bloco de carga na pista da roda. A linha de ação da carga vertical pode ser direcionada em qualquer posição lateral sobre a pista.

A carga lateral é desenvolvida por um cilindro hidráulico através de uma instalação separada que é controlada na borda da roda oposta.

O bloco de carga lateral tem uma superfície conjugada que iguala a flange e o perfil da pista. O bloco de carga é assentado e preso no lugar pela carga vertical.

Equações para relacionar valores de carregamentos vertical e lateral e posição lateral da carga vertical com os sinais de saída das pontes de extensômetros, derivam dos dados de calibração. Esse conjunto de equações é apresentado a seguir:

$$V = 32 \frac{\left[\frac{A (E_v) + BL}{E_{calv}} \right]}{[C + DP]} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{10}{E} \left[\frac{F (E_l) + (G + HP) (\frac{V}{32})}{E_{call}} \right] \quad (2.4)$$

$$P = J - K \frac{\left[\frac{M (E_p) + NL }{E_{calp}} \right]}{\left[\frac{A (E_v) + BL }{E_{calv}} \right]} \quad (2.5)$$

onde: V é a carga vertical (Kips)

L é a carga lateral (positiva quando direcionada para a flange, Kips).

P é a posição da carga vertical, que é zero no "tape line" (linha de referência na banda de rodagem da roda) e positiva na direção da flange).

E_v é o valor absoluto do sinal, em volts, da ponte vertical mais próxima da do ponto de contato roda/trilho.

E_l é a resultante (determinada pela série de Taylor) da combinação entre os sinais de saída das duas pontes laterais.

E_p é o valor absoluto do sinal de saída da ponte de posição medida a cada 90 graus (1/4 de roda).

E_{calv} , E_{call} e E_{calp} são sinais em volts recomendados para resistores de calibração, e as pontes respectivas.

A, F e M são tensões associadas com os sinais de calibração Shunt para a pontes Vertical, lateral e de posição, respectivamente medidas durante o teste de calibração (mv).

B é o sinal do "efeito cruzado" na ponte vertical para carga lateral unitária 1 Kips (mv).

C é a média da somatória dos valores absolutos do sinal da ponte vertical para a carga no tape line (mv).

D é o fator de correção do sinal da ponte vertical, para posição lateral da carga Vertical (mv).

E é a somatória das médias para o sinal da ponte Lateral, para 10 Kips de carga lateral (mv).

G e H são as constantes que relacionam a correção da carga lateral para a posição da carga Vertical.

J e K são as constantes relativas a posição da carga vertical em função da razão entre o sinal da ponte de posição e o sinal da ponte vertical.

N é o valor do "efeito cruzado" no sinal da ponte de posição para uma carga lateral unitária de 1 Kips (mv).

A resultante dos dois canais, das pontes laterais, é calculada da seguinte forma (série de Taylor) :

$$E1 = MAX + \left[\frac{MIN}{2(MAX)^2} \right] - \left[\frac{(MIN)^3}{N(MAX)^4} \right] \quad (2.6)$$

onde: MAX é o máximo valor absoluto para a ponte L1 ou L2;

MIN é o mínimo valor absoluto para a ponte L1 ou L2;

N = 8, se L1 e L2 forem funções senoidais.

2.1.5.4 Processamento dos dados

A primeira coisa a ser feita no processamento de dados, é a identificação da posição da rotação da roda. Faz-se isso com a saída da ponte de posição, que tem um valor de pico a cada rotação de 1/4 da roda.

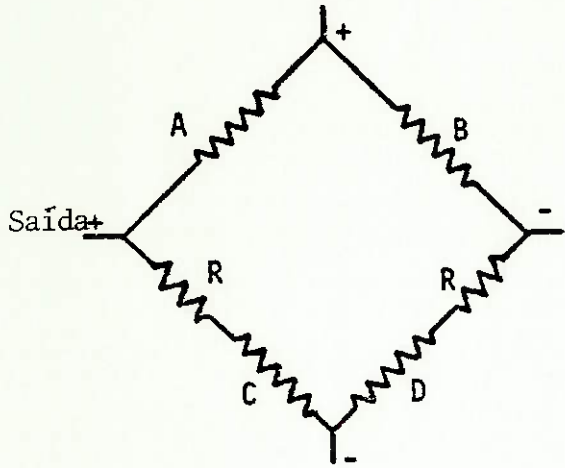
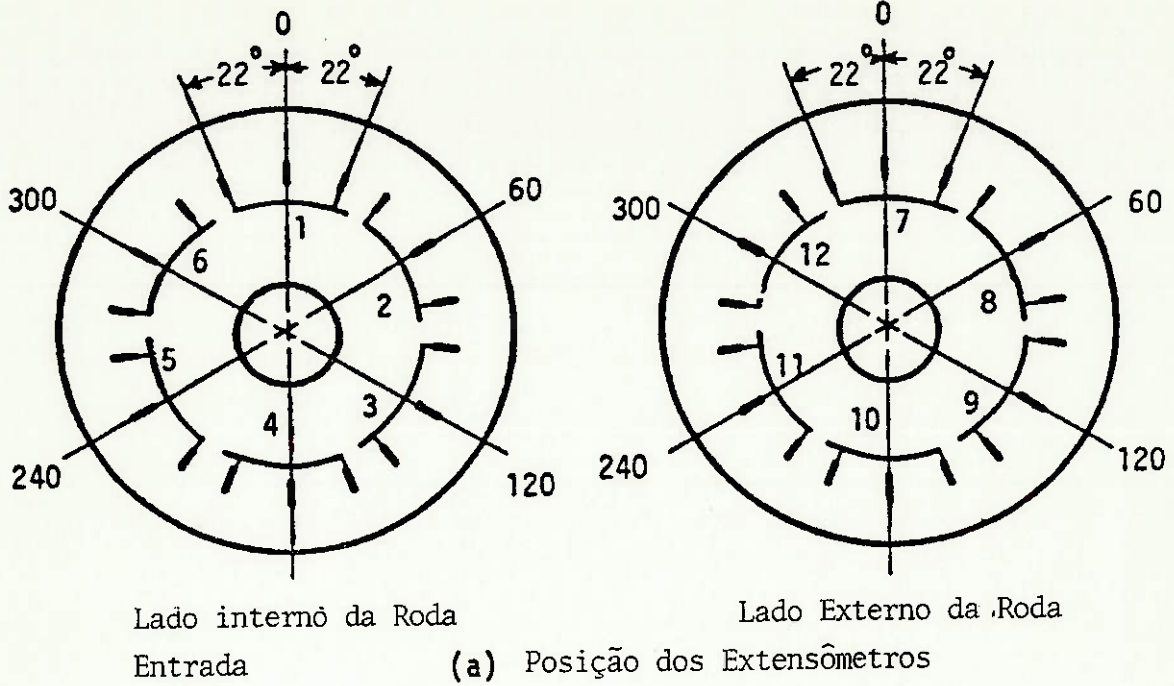
Sabendo a posição de rotação da roda, pode-se escolher quais os sinais das pontes verticais e laterais são apropriados para serem usados numa dada posição, durante a rotação da roda.

Interessa apenas o sinal de saída da ponte que está mais próxima do ponto de contato roda/trilho. Portanto, uma dada saída de ponte vertical é usada para somente 60 graus de rotação da roda, então o sinal usado passa a ser o da ponte adjacente, etc.

O sinal da saída da ponte lateral muda a cada rotação de 90 graus da roda.

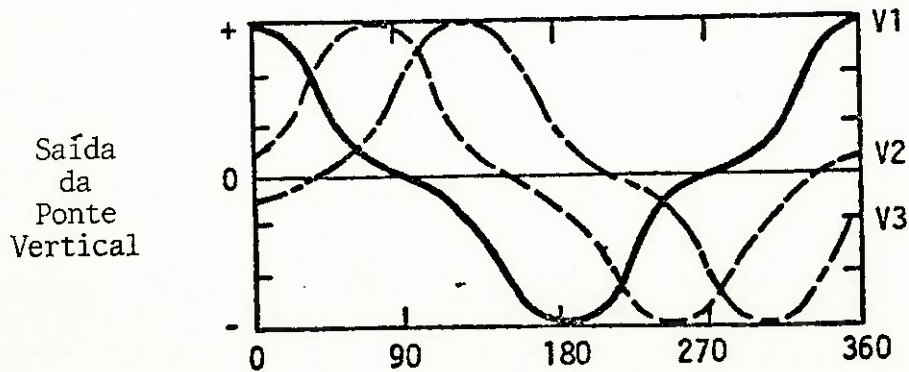
Estabelecida a posição rotacional em função do tempo, através da saída da ponte de posição, as saídas das pontes verticais e laterais são ajustadas para explicar a causa da atenuação da saída da ponte, enquanto o ponto de contato gira para longe da linha de centro da ponte.

O sistema de equações é resolvido somente para as posições 0, 90, 180 e 270 graus (a cada 1/4 de roda). Nas outras posições, somente as equações para determinação de Q e Y são resolvidas, usando o valor de P determinado no quarto de roda anterior.



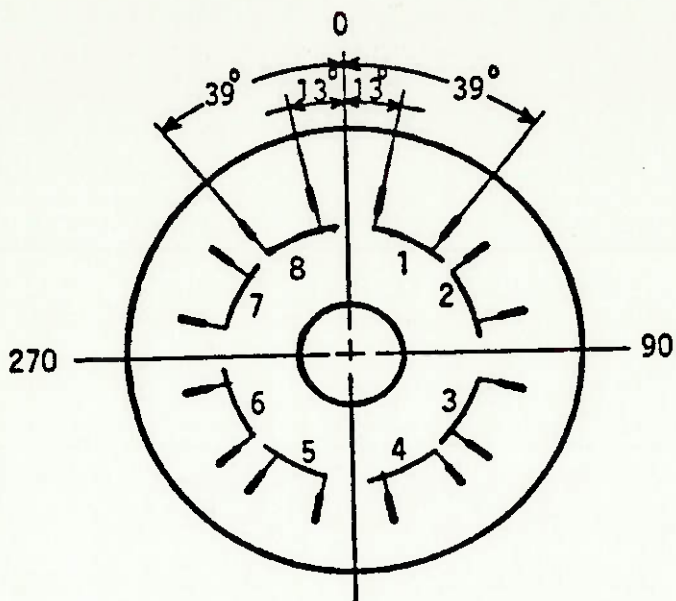
Ponte	Posição das Pontes			
	A	B	C	D
V1	10	7	1	4
V2	11	8	2	5
V3	12	9	3	6

(b) Configuração das Pontes

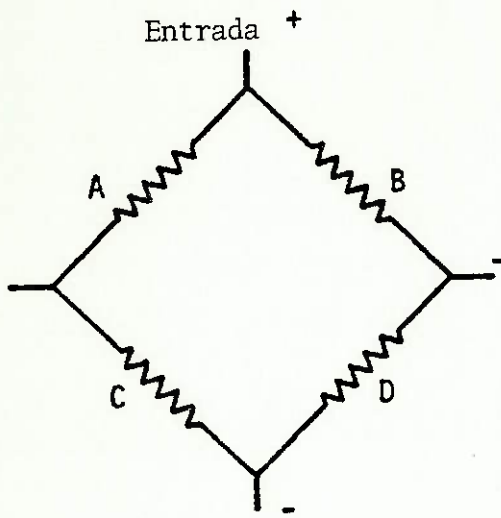


(c) Sinal de Saída

Figura 2.10: Configuração da Ponte para Medição da Carga Vertical (IITRI)

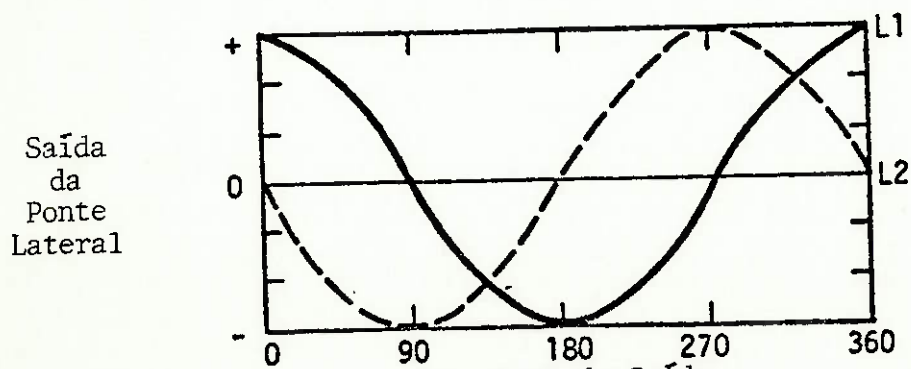


(a) Posição dos Extensômetros



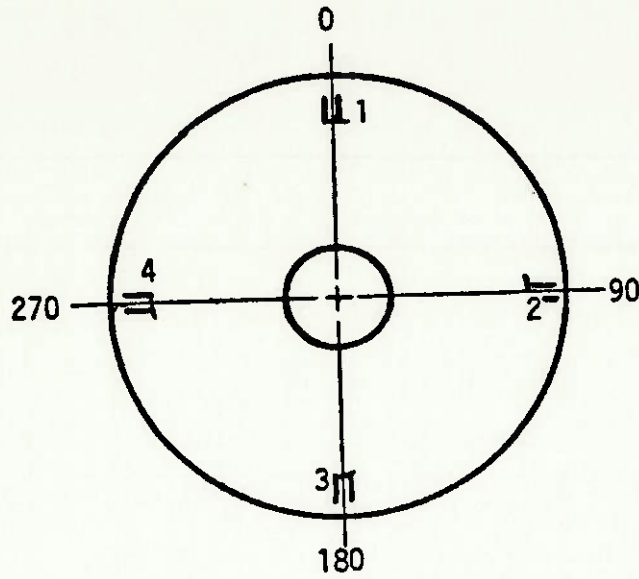
Ponte	Posição da Ponte			
	A	B	C	D
L1	1	4	5	8
L2	2	6	7	3

(b) Configuração da Ponte

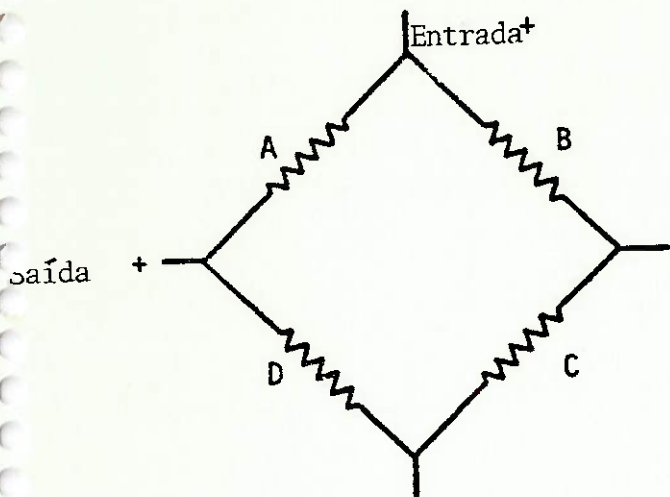


(c) Sinal de Saída

Figura 2.11: Configuração da Ponte para Medição da Carga Lateral (IITRI)

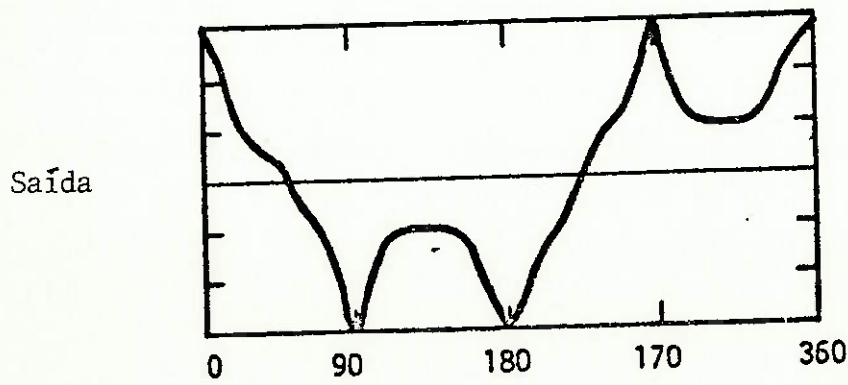


(a) Posição do Extensômetro do lado interno da roda



Ponte	Posição da Ponte			
	A	B	C	D
Posição	1	2	4	3

(b) Configuração da Ponte



(c) Saída- la Ponte

Figura 2.12: Configuração da Ponte para Medição da Posição(IITRI)

2.1.6 Sistema Wyle (Laboratório de Pesquisas de Colorado) de adaptador de mancal (de roda e eixo) instrumentados [8].

O sistema de medição de força emprega medição direta das cargas verticais que agem nas mangas e os momentos de flexão em duas localizações, no eixo, para calcular as forças vertical e lateral no contato roda/trilho.

2.1.6.1 Medição das cargas vertical e lateral

A Figura 2.13 ilustra o sistema de forças que atuam num conjunto roda/eixo. Assume-se que o rodeiro comporta-se como um corpo livre, rígido, no qual agem cinco forças desconhecidas: a lateral (LR e LL), a vertical (VR e VL), que interagem na interface roda/trilho e força lateral(LN), da estrutura do "truck" que agem ao longo linha de centro do eixo. As cargas verticais (BR e BL), que age nos dois mancais de deslizamento, é obtida através de células de carga apoiadas nos mancais. As equações de equilíbrio para o rodeiro podem ser escritas para determinar as forças desconhecidas, se os momentos de flexão no eixo forem medidos em dois locais(MR e ML). Resolvendo as equações de equilíbrio, obtem-se as seguintes expressões para as cargas que agem no contato roda/trilho:

$$VL = BL - \left[\frac{(ML - MR)}{(f - e - d)} \right] \quad (2.3)$$

$$LL = \frac{1}{c} \left[\frac{MRd - ML(f - e)}{(f - e - d) - BLa} \right] \quad (2.4)$$

$$VR = BR - \left[\frac{(MR - ML)}{(f - e - d)} \right] \quad (2.5)$$

$$VR = \frac{1}{c} \left[\frac{MLe - MR (f - d)}{(f - e - d) - BRb} \right] \quad (2.6)$$

onde: a, b, c, d, e f são dimensões físicas, relativas ao posicionamento dos esforços que agem no rodeiro.

Os adaptadores de apoio modificados usados no sistema Wyle foram calibrados usando-se uma instalação de compressão de "truck". Um certo número de diferentes posições de carga foi usado.

Uma família de curvas foi desenvolvida para essas configurações. As pontes, de momento fletor foram calibradas pela aplicação de forças laterais nas bordas interiores do rodeiro. Durante a aplicação dessas cargas, uma roda ficou apoiada num mancal de ar a fim de garantir liberdade nas direções lateral e longitudinal.

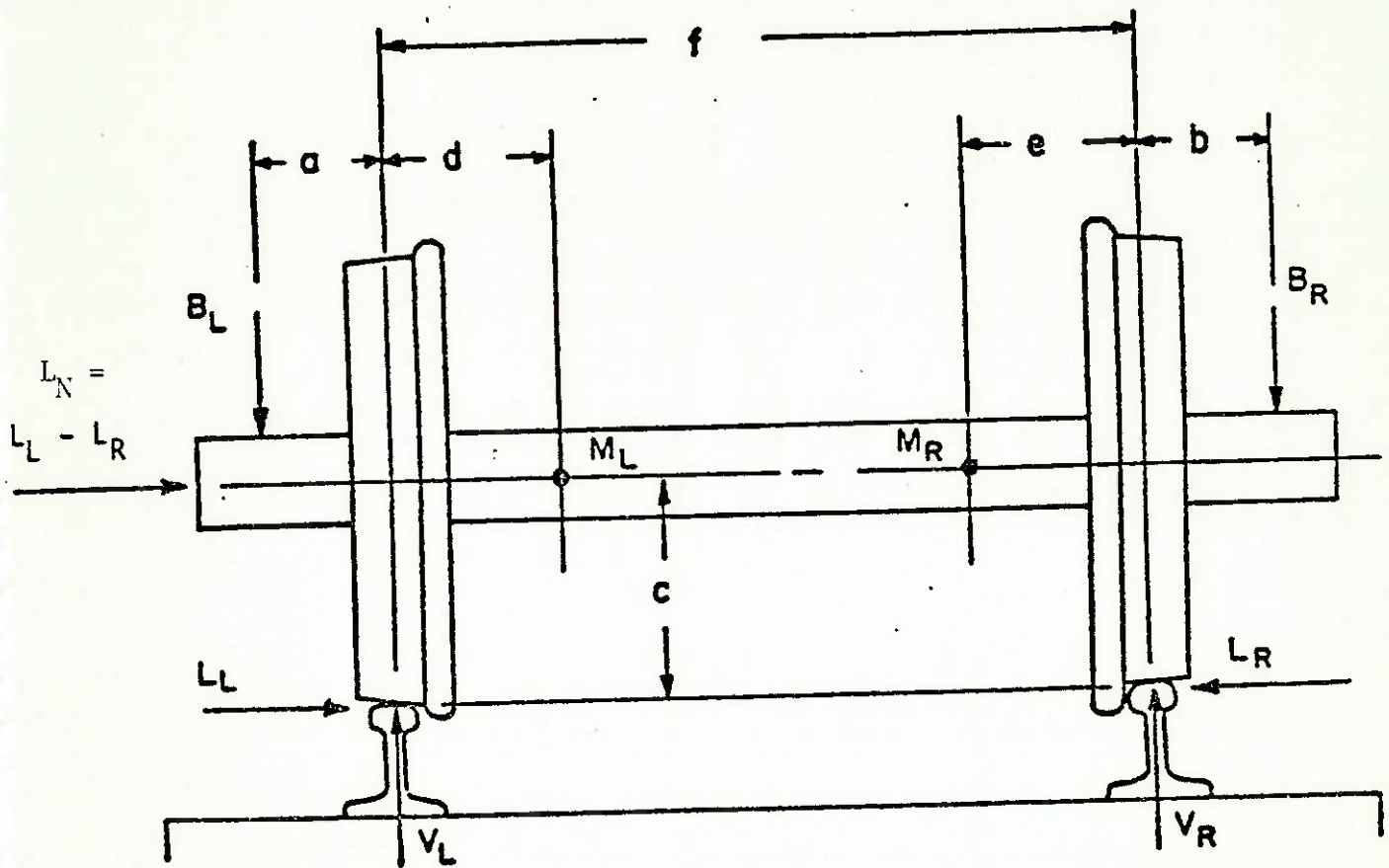
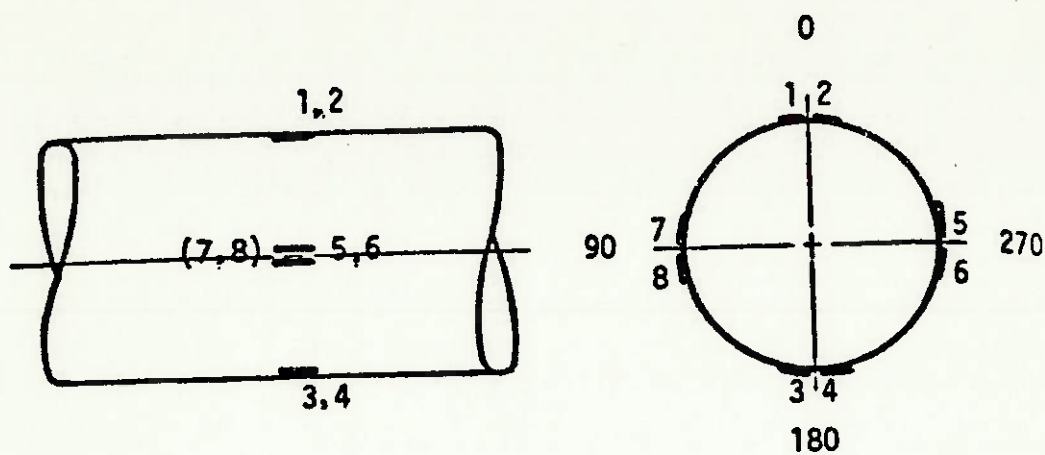
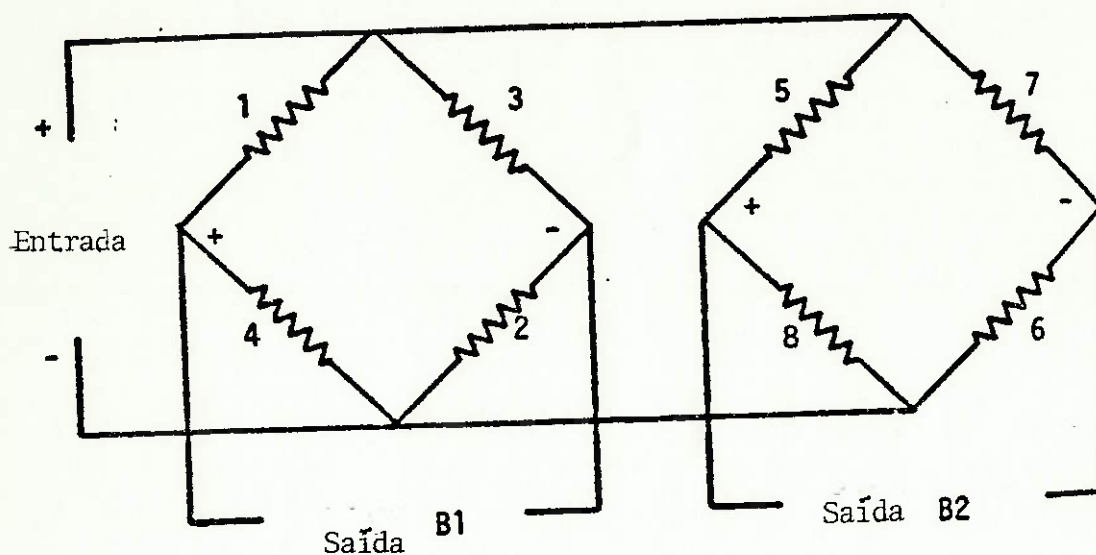


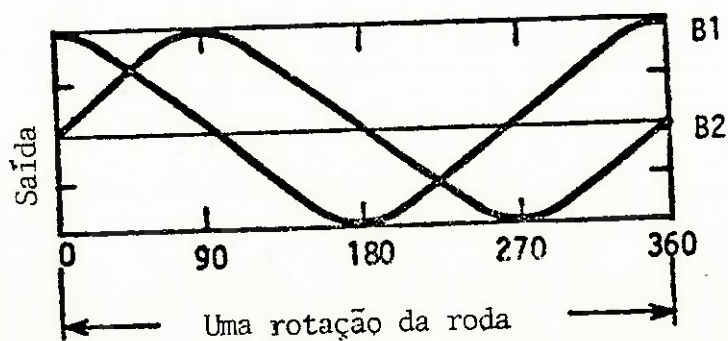
Figura 2.13: Diagrama de Corpo Livre para o Eixo



(a) Posição dos Extensômetros
Eixo Instrumentado



(b)- Configuração da Ponte



(c) Saída do Sinal

Figura 2.14: Configuração da Ponte para Medição do Momento no Eixo do WYLE (Laboratório de Pesquisas de Colorado Spring, Colorado-U.S.A)

2.2 ESPECIFICAÇÃO PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO

2.2.1 Aplicação

A especificação da Federal Railroad Administration[9] refere-se a um sistema de instrumentação ferroviária embarcada que mede:

- as forças vertical e lateral entre roda e trilho na interface roda/trilho,
- a posição lateral da roda em relação ao trilho

2.2.2 Requisitos de performance

2.2.2.1 Medições de força

Os requisitos de performance para medição das forças roda/trilho são os seguintes.

- Força vertical:

Medição contínua de forças de 0 a 220 kN com uma precisão de $\pm 2,0\%$ (± 4.4 kN) do fundo de escala, para a componente vertical da carga roda/trilho orientada sobre a pista da roda dentro de um setor de ± 25 mm da "tape line".

- Força lateral:

Medição contínua de forças de 0 a 130 kN com uma precisão de $\pm 2\%$ (± 2.7 kN) do fundo de escala, para a componente lateral da carga roda/trilho que tem linha de ação posicionada entre a pista na "tape line" e o ponto de medição na flange da roda.

Esses requisitos de performance podem ser demonstrados executando-se os procedimentos de teste de calibração descritos nas seções 2.2.4.1 e 2.2.4.2.

2.2.2.2 Medições de posição da roda

Medição contínua dentro de $\pm 0,05$ mm, num campo total de 50 mm. Esses requisitos de performance podem ser demonstrados executando-se os procedimentos descritos na seção 3.3.3

2.2.3 Outros requisitos de performance

2.2.3.1 Resposta em frequência

As características de resposta em frequência do sistema de medição de carga devem estar no mínimo em 400 Hz. A taxa de amostragem de dados deve ser suficiente para fornecer um conjunto de dados no mínimo a cada 50 mm de trilho. As características de resposta de frequência do sistema de medição de posição deve estar no mínimo em 50 Hz.

2.2.3.2 Estabilidade do sistema de medição de posição

A estrutura de referência do sistema de medição de posição será planejada de forma que uma carga vertical ou lateral de 5g, não mova o ponto de apoio de algum dos transdutores de deslocamento mais que 0,13 mm.

2.2.3.3 Teste de giro

Os rodeiros instrumentados de medição de carga devem ser rodados descarregados à uma velocidade equivalente a 120 km/h. A saída das pontes de carga não deve exceder 1,0% do fundo de escala .

2.2.4 Procedimentos de calibração

Os procedimentos seguintes devem ser usados durante os testes de calibração para se verificar se os requisitos de performance estão sendo satisfeitos.

2.2.4.1 Cargas verticais

Um certo número de cargas de teste vertical deve ser aplicado à pista da roda da seguinte forma:

2.2.4.1.1 Numa seção transversal dada aplicar cargas verticais (radiais) sobre a pista da roda nas posições: a 25mm da "tape line" (linha de referência na banda de rodagem da roda) ; na "tape line"; e entre 18mm e 25mm da "tape line".

2.2.4.1.2 Repetir a aplicação das séries de carga acima a intervalos de 5 graus, ou menos, ao redor da roda. Os dados de saída dos testes de aplicação de carga vertical devem ser processados utilizando-se o sistema de processamento de dados que se pretende usar com a roda durante aplicações práticas do sistema. Os seguintes passos devem ser seguidos :

2.2.4.1.3 Gravar os dados de saída, continuamente, durante a aplicação da carga, ou um mínimo de 5 passos de carga, aproximadamente, iguais de 0 a 225 kN.

2.2.4.1.4 Determinar o melhor ajuste linear dos dados de saída, em cada ponto de carga, como função da carga aplicada.

2.2.4.1.5 Determinar o máximo desvio dos dados indicados do ajuste linear.

2.2.4.1.6 Determinar os dados de saída na carga máxima, de acordo com o melhor ajuste linear dos dados de saída, e determinar seu desvio da carga de calibração.

2.2.4.1.7 Somar os desvios assinalados nas etapas 2.2.4.1.5. e 2.2.4.1.6. acima para obter o desvio total. Se o desvio de carga estiver dentro de 2,0% do fundo de escala, o resultado pode ser considerado aceitável.

2.2.4.2 Cargas laterais

Um certo número de cargas de teste lateral deve ser aplicado, separadamente, à pista da roda, da seguinte forma:

2.2.4.2.1 Numa dada seção transversal aplicar cargas laterais (paralelas ao eixo da roda), à pista da roda, com a linha de ação da carga dividindo a pista entre a "tape line" e o ponto de medição na flange. A aplicação da carga lateral pode ser acompanhada pela aplicação, simultânea, de uma carga vertical.

2.2.4.2.2 Repetir a aplicação das séries de carga, acima, à intervalos de 5 graus ou menos ao redor da roda. Os dados de saída do teste de aplicação de carga lateral devem ser processados utilizando-se o sistema de processamento de dados que se pretende usar com a roda durante aplicações práticas do sistema. As seguintes etapas devem ser seguidas:

2.2.4.2.3 Gravar os dados de saída continuamente, durante a aplicação da carga, ou um mínimo de cinco passos de carga, aproximadamente iguais de 0 a 130 kN.

2.2.4.2.4 Determinar o melhor ajuste linear dos dados de saída, em cada ponto de carga, como função da carga aplicada.

2.2.4.2.5 Determinar o máximo desvio dos dados indicados do ajuste linear.

2.2.4.2.6 Determinar os dados de saída, na carga máxima, de acordo com o melhor ajuste linear dos dados de saída, e determinar seu desvio da carga de calibração.

2.2.4.2.7 Somar os desvios assinalados nas etapas 2.2.4.2.5 e 2.2.4.2.6 acima, para obter o desvio total. Se o desvio de carga estiver dentro de 2% do fundo de escala, o resultado pode ser considerado aceitável.

2.2.5 Medições de deslocamentos

Os testes de calibração devem ser realizados numa instalação apropriada. A instalação permitirá ao sistema de medição de posição, ser disposto de uma maneira similar a uma aplicação num "truck" de teste.

A instalação será equipada com comprimentos de trilho móveis, nos lugares onde os deslocamentos de trilho devem ser medidos pelo sistema.

Os trilhos serão movidos de maneira controlada e documentada, através da faixa de deslocamento especificada, em cada uma das localizações de transdutores, enquanto a saída do sistema é monitorada e gravada.

A saída medida será comparada aos deslocamentos atuais. Se o desvio do deslocamento medido, e do atual, for menor que 2% do campo de medição máximo, o resultado pode ser considerado aceitável.

Dispositivos devem ser feitos para a oscilação senoidal dos trilhos em cada localização de medição. Os trilhos serão sujeitos a oscilações na faixa de 1 a 50 Hz.

O deslocamento, pico a pico, dessa oscilação, deve estar limitado a 50 mm ou a máxima aceleração do movimento deve estar limitada a 25 g, o que for menor.

2.2.6 Aprovação

Seis horas consecutivas de operações, na via, sem acidentes elétricos ou mecânicos, devem ser verificadas antes do sistema ser considerado aceito.

2.2.7 Tabelas Comparativas

As tabelas das páginas 62 e 63 mostram a avaliação de diversos modelos de instrumentação de rodeiros, considerando o posicionamento dos sensores nas rodas ou no eixo. As informações são baseadas em relatórios fornecidos pelos fabricantes à FRA (Federal Railroad Administration/Washington-U.S.A.)[9]. Os fatores de avaliação recebem pontuação de acordo com o grau de importância no desempenho geral do sistema.

A Tabela 1 (fatores de aplicação) mostra o grau de dificuldade na implementação de cada modelo, através dos itens que compõem sua aplicação no sistema ferroviário.

A Tabela 2 (fatores analíticos) traz os itens que interferem na saída dos sinais elétricos provenientes dos sensores, provocando distorções que nem sempre podem ser corrigidas.

Na Tabela 3 (experiência operacional) tem-se os fatores que levam a definir parâmetros através do uso sistemático. A operacionalização estabelece critérios adequados para a utilização do sistema.

A Tabela 4 (processamento de dados) define as limitações na aquisição e tratamento dos dados, considerando a performance do sistema para tratamento em tempo real.

2.2.8 Procedimento de avaliação

O procedimento de avaliação é descrito nessa seção. Tem-se duas partes principais. A primeira parte lida com a avaliação dos sistemas com respeito às diferentes características e fatores, baseados na experiência. Algumas dessas características podem ser avaliadas analiticamente, de modo que podem ser feitas comparações entre os sistemas numa base comum, para que as características mais desejadas desses sistemas possam ser identificadas e incorporadas a futuros sistemas.

Na segunda parte dos procedimentos de avaliação é analisado se cada um dos sistemas pode satisfazer aos requisitos de performance definidos.

2.2.9 Fatores de avaliação

Os fatores identificados para consideração na avaliação dos conceitos de medição de posição e carga roda/trilho são mostrados no item 2.2.2 deste trabalho.

A discussão colocada no item 2.2.10 é dividida em quatro grupos, incluindo as que dizem respeito à aplicação direta do sistema, as que lidam com as características dos sinais de saída, as relativas a experiência na operação do sistema, e as que dizem respeito ao processamento de dados. E são referentes às Tabelas 1, 2, 3 e 4.

Os procedimentos de avaliação são agora descritos. A Tabela 1 tem uma coluna chamada "Escala de Avaliação", que é usada no processo de avaliação e fornece valores numéricos que estão relacionados a cada uma dos fatores que determinam o desempenho de cada sistema.

Esses valores referem-se a cada um dos quatro grupos de fatores de avaliação e a cada questão dentro do grupo. A soma de todos os valores da escala de avaliação é 100 pontos.

As bases para o relacionamento dos pontos a cada conceito, estão resumidas a seguir:

2.2.10 Discussão dos fatores de avaliação.

Esta seção apresenta uma discussão de cada um dos fatores de avaliação listados nas Tabelas 1, 2 e 3.

2.2.10.1 Limitações quando ao tipo de "truck".

Não existem limitações no uso de sistemas de roda instrumentada para a medição de forças roda/trilho. Sistemas desse tipo têm sido

aplicados a locomotivas, carros de passageiros e "trucks" de carros de carga. Todos os sistemas têm a mesma pontuação com respeito a esse fator.

2.2.10.2 Restrições quanto ao tipo de roda.

Não existe nenhuma restrição básica no uso de qualquer sistema de medição de alma de roda à rodas de um tipo específico, exceto para o sistema BR, usado somente em rodas raiadas. Entretanto, foi mostrado que certos sistemas têm melhor performance em certos tipos de roda do que em outros. Isto é colocado nas Tabelas 5 e 6, onde é mostrado que os sistemas ASEA/SJ e IITRI têm melhor performance numa roda de alma reta, enquanto que dos conceitos da AAR e EMD, pode-se esperar melhor performance numa roda de alma curva.

O desgaste significativo no aro da roda tenderia a mudar a natureza da resposta dos sinais à carga roda/trilho. Assim, é necessária especial consideração para a localização ótima dos extensômetros nas pontes.

Os efeitos de pequenos desgastes na banda de rodagem devem ser mínimos, podendo ser corrigidos por mudanças nas constantes de calibração da roda. Os sistemas de medição de posição não têm limitações com relação ao tipo de roda.

Todos os sistemas têm pontuação igual em relação a esse fator, exceto o sistema de medição de carga da BR, com pontuação levemente inferior por se restringir a rodas raiadas.

2.2.10.3 Limitações quanto a fatores ambientais.

Os sistemas considerados nesse estudo não têm limitações óbvias para operação em ambiente ferroviário normal. Os rodeiros instrumentados, entretanto, não devem ser operados em condições de frenagem de banda a fim de minimizar a probabilidade de avaria por aquecimento dos extensômetros ou da fiação associada.

A experiência operacional tem mostrado que vento com areia ou pequenas pedras estão sempre presentes durante as operações de teste. Isso é uma ameaça aos circuitos dos extensômetros que devem ser protegidos. A influência da umidade é agravada pela alta resistência da ponte e as tensões relativamente baixas associadas às cargas.

Todos os sistemas têm a mesma pontuação para esse fator.

2.2.10.4 Manutenção necessária num programa de teste.

Os "slip rings" nos rodeiros instrumentados devem ser removidos enquanto os dados não estão sendo gravados. Frequentes inspeções das estruturas dos sistemas de medição de posição são aconselháveis por causa do ambiente de vibração severo no qual elas operam.

Todos os sistemas têm pontuação igual, com respeito a esse fator, exceto o sistema de medição de posição da AAR.

2.2.10.5 Acessibilidade, para reparo de campo, dos componentes que podem quebrar durante o teste.

A reposição de conjuntos de "slip rings" defeituosos e da fiação externa aos circuitos da ponte são reparos de campo exeqüíveis nos sistemas de medição de carga de roda. Também, a determinação da localização dos extensômetros pode ser feita usualmente em campo.

Contudo, substituir um extensômetro não é um reparo de campo prático. O circuito de ponte é virtualmente encapsulado pela pintura do extensômetro. A intrusão dentro desse selo, no ambiente de campo, é provável que comprometa a estabilidade de operação do sistema.

Deve ser assumido que a reposição de um extensômetro, não altera significativamente a sensibilidade de ponte como fornecida pelos dados de calibração. A experiência com o sistema IITRI mostrou ser isso uma suposição válida.

Quando necessário, a reposição de extensômetros é mais fácil nos sistemas que usam extensômetros soldáveis do que naqueles que usam extensômetros colados. Todos os sistemas de medição de carga têm pontuação igual com respeito a esse fator. O sistema de medição de posição Wyle tem maior pontuação com respeito a esse fator, porque o adequado conceito de projeto, facilita reparos de campo.

2.2.10.6 Equipamentos necessários para os sistemas de reparo e socorro.

Nenhum dos sistemas tem necessidade de equipamento de serviço especial. O equipamento de teste convencional para trabalhos em campo com extensômetros, tais como medidores de voltagem digital, fontes de força regulada, e osciloscópios, pode ser usado para solucionar a maioria dos problemas que poderiam ser encontrados.

Todos os sistemas têm pontuação igual com relação a esse fator.

2.2.10.7 Tempo de vida esperado para o dispositivo.

O conjunto de "slip rings" usado nos sistemas de medição de carga é provavelmente o componente que teria o tempo de vida mais curto.

Espera-se que dure por volta de 1600 horas em velocidade normal de uso. Contudo, se usado em condições de grande vibração, terá tempo de vida reduzido.

Todos os sistemas de medição de carga têm pontuação igual com respeito a esse fator. Não existe desgaste significativo da roda por no mínimo 10000 milhas (16000 km). A taxa de desgaste dependerá das condições de operação.

Um desgaste substancial influencia os fatores de calibração e a sensibilidade de interferência, fazendo necessária uma nova calibração do dispositivo.

Estimativas para a vida dos componentes não foram estabelecidas para os sistemas de medição de posição pela pouca experiência de operação.

Todos os sistemas de medição de posição têm pontuação menor que o valor de avaliação com respeito a esse fator porque é necessária uma experiência de operação adicional para o desenvolvimento de componentes de vida longa.

2.2.10.8 Componentes que devem ser repostos após um teste.

Nenhum dos conceitos designou partes desgastáveis que são repostas após o teste. Tem sido usual a prática de reposição dos discos de cobertura da roda, no rodeiro IITRI ao final de cada série de teste.

Todos os sistemas têm pontuação igual com respeito a esse fator porque não existe evidência de que um dos sistemas tenha uma vantagem sobre outro nessa questão.

2.2.10.9 Precisão e funcionamento do sistema monitorado durante um programa de teste.

Cada sistema utiliza um tipo de configuração para monitoração. A EMD usa um processador de dados analógico de tempo real que computa e mostra a carga lateral, a carga vertical, e a relação Y/Q.

A BR usa um micro-processador para logaritmar, processar e mostrar as forças vertical, lateral, e longitudinal e certos parâmetros derivados dessas forças em quase tempo real.

O sistema AAR usa um mostrador em tempo-real, tal como aquele de um osciloscópio, para a observação dos sinais de saída. A ASEA/SJ processa ambas as saídas de ponte vertical e lateral em tempo-real para uma amostragem contínua.

A IITRI mostra os sinais de dados brutos das pontes de extensômetros para monitorar o funcionamento próprio do sistema. A Wyle faz gravações analógicas em tempo real de canais de dados selecionados para monitorar a qualidade dos dados. Uma leitura rápida dos dados, possibilita rever todos os canais de dados gravados, de trechos selecionados do teste. Os sistemas de medição de posição, geram um sinal de voltagem analógico que é função do deslocamento. Esse sinal é usualmente mostrado num osciloscópio.

Os sistemas de medição de carga IITRI, AAR e Wyle têm uma pontuação um pouco menor com respeito a esse fator, porque eles (somente no vertical da AAR) não fornecem amostragem de dados em tempo real. Os sistemas de medição de posição têm pontuação igual.

2.2.10.10 Problemas na integração dos subsistemas de medição de carga e posição.

O maior problema na integração dos sistemas de medição de carga e posição é o fornecimento de apoio para a estrutura de referência do sistema de medição de posição da roda, sem interferir no uso dos conjuntos de "slip-ring" no sistema de medição de carga.

Os sistemas AAR e BR utilizam extensões nos eixos para o apoio da estrutura de referência. Os cabos de instrumentação vindos das pontes de extensômetros da roda devem passar através dessas extensões e devem também ser usados para apoiar os conjuntos de "slip ring".

Essa extensão deve ser concêntrica com o eixo para minimizar vibrações. Essas vibrações podem avariar o sistema de deslocamento e os conjuntos de "slip ring" no rodeiro instrumentado.

Os sistemas de medição de carga têm pontuação igual em relação a esse fator. Os sistemas de medição de posição AAR e BR têm pontuação levemente menor porque dependem dos apoios de extensão de eixo.

Os sistemas Wyle têm pontuação maior, porque não utilizam essa característica.

2.2.10.11 Necessidade de condicionamento de sinal especial, equipamento de transmissão de sinal especial ou técnicas especiais.

Nenhum requisito especial está associado com nenhum dos sistemas descritos neste relatório. Os sistemas de medição de carga usam técnicas de "slip ring" padrões para obter sinais do eixo para os sistemas de registro de dados. Todos os sistemas têm pontuação igual com respeito a esse fator.

2.2.10.12 Sensibilidade do sinal inicial.

As sensibilidades relativas dos vários sistemas de medição de carga estão apresentadas nas tabelas 5 e 6. Notar que as sensibilidades laterais são consideravelmente maiores que as sensibilidades verticais para a maioria dos sistemas.

A sensibilidade de tensão relativa é geralmente o resultado de um compromisso entre a obtenção de um sinal de saída largo, a minimização de interferência, e a obtenção de um sinal que se aproxime de uma saída contínua.

Os sistemas de medição de carga têm pontuação igual e menor que o valor de avaliação total porque deficiências na potência do sinal de saída estão presentes em todos os sistemas.

O sistema AAR possui a saída mais alta para a ponte de carga vertical. Os sistemas IITRI e EMD têm as saídas mais altas para a ponte de carga lateral.

Espera-se para o sistema BR um sinal de saída relativamente baixo pelo do grande número de extensômetros em cada ponte.

Os níveis de tensão associados ao sistema de momento fletor de eixo de medição de carga lateral da Wyle são comparáveis aos sistemas de alma de roda instrumentada.

2.2.10.13 Interferência entre os canais de carga lateral e vertical no sistema de medição de carga.

Os resultados mostrados nas Tabelas 5 e 6 para o sistema EMD indicam que existe interferência na ponte lateral devida à carga vertical e ocorre interferência na ponte vertical devida à carga lateral. Não existem dispositivos para corrigir esses efeitos de interferência.

A BR relata que a ponte de força longitudinal é virtualmente livre de efeitos de interferência de carga vertical e lateral. Do mesmo modo, a ponte de força lateral não é afetada pelas cargas vertical ou longitudinal. É relatado que a saída da ponte de força vertical é significativamente influenciada pela carga longitudinal e de forma menor pela carga lateral. Foi relatado que esses efeitos são corrigidos durante o processamento de dados.

As pontes de força lateral e vertical da AAR exibem menores efeitos de interferência. Não existem dispositivos para a correção desses efeitos.

A resposta da ponte vertical da ASEA/SJ à carga lateral é corrigida no processamento de dados. A resposta da ponte lateral à carga vertical é desprezível.

Os efeitos de interferência são corrigidos no sistema IITRI. A carga lateral tem efeito na saída da ponte vertical e a carga vertical tem efeito na saída da ponte lateral. O sistema Wyle tem bastante interferência da carga vertical, na ponte de momento fletor do eixo.

Valores calculados para os efeitos de interferência são fornecidos nas Tabelas 5 e 6 para os sistemas de alma de roda instrumentada.

Esses números servem para quantificar a magnitude dos efeitos de interferência presentes em cada sistema.

Os sistemas de medição de carga Wyle, AAR e EMD têm pontuação menor que a dos outros sistemas de medição de carga com respeito a esse fator, porque não fornecem correções para os efeitos de interferência.

2.2.10.14 Sensibilidade das saídas das pontes à posição da carga.

Os efeitos sobre os sistemas de medição de carga são discutidos primeiro. As Tabelas 5 e 6 incluem valores calculados para a sensibilidade da saída de ponte, para a posição da carga.

Vários efeitos e procedimentos, foram relatados para os diferentes sistemas. A EMD relata que a sensibilidade da saída da ponte de carga vertical à posição lateral da carga vertical, é de aproximadamente 7%.

A EMD justifica que o maior interesse no teste está centrado na força gerada quando a roda está flangeando. Por isso, as rodas foram calibradas na posição de flangeamento.

A influência da posição da carga vertical sobre a carga lateral não é dada.

A BR estabelece que a saída longitudinal aumenta 0,019% por polegada (0,48% por mm), enquanto o ponto de contato do trilho se move para cima da flange. É relatado que a ponte de força lateral da BR não é afetada pela posição da carga.

Uma compensação de 0,40 polegadas (10mm) da carga vertical em relação ao centro da banda muda a saída da ponte de força vertical da BR de 0,3%. Esse efeito é desprezível.

A AAR relata que um aumento na saída da ponte de carga vertical é por volta de 4% para um movimento de 1,75 polegadas (44mm) para

fora da posição de carga vertical.

Não existem dados disponíveis indicando o efeito da posição na carga lateral. A influência da posição da carga não está incluída no processamento de dados.

A ASEA/SJ relata que não existe nenhuma variação mensurável na saída da ponte em função da posição lateral da carga vertical. Isso é atribuído ao uso da alma de roda "S-shaped" (formato S).

O sistema IITRI é afetado pela posição da carga. A saída vinda da ponte de força lateral é equivalente a uma carga lateral de 1600 lb (7,1 kN) para um movimento lateral para fora de 1 polegada (25,4 mm) de uma carga vertical de 32000 lb (142 kN) da "tape line".

A ponte de carga vertical tem uma variação de aproximadamente 3% na saída para um deslocamento de 1 polegada (25,4mm) da carga vertical em relação à "tape line". A influência da posição da carga é corrigida no processamento de dados.

No sistema Wyle a determinação da carga vertical não é substancialmente influenciada pela posição da carga.

A determinação da carga lateral é influenciada pela localização da aplicação da carga vertical sobre o adaptador de mancal, a localização das cargas laterais sobre o adaptador de mancal e a posição de contato roda/trilho.

O sistema de medição de carga da IITRI tem pontuação igual ao valor de avaliação com respeito a esse fator porque faz correção nos efeitos da posição da carga.

O sistema BR também tem pontuação igual ao valor de avaliação pela sua precisão. Os outros sistemas têm pontuação menor.

2.2.10.15 Influência de outros fenômenos no sinal de saída.

As combinações sistema/ponte onde existe um problema potencial são a ponte lateral da AAR e a ponte lateral da ASEA/SJ. Em consequência, esses sistemas têm pontuação menor em relação a esse fator.

A ponte lateral da BR tem um problema potencial devido a esses efeitos, mas uma determinação quantitativa não pode ser feita nesse momento.

A influência dos campos magnéticos é um outro fenômeno que deve ser considerado. A movimentação de um condutor num campo magnético causa uma corrente induzida no condutor.

Esse sinal foi identificado como uma fonte de interferência para os circuitos de extensômetros. Os motores de tração e os circuitos de sinalização são fontes de campos magnéticos ocasionais.

O magnetismo residual no trilho é uma outra possível fonte de influência de campo magnético, mas isso não foi investigado em profundidade.

A minimização dos efeitos de campo magnético é considerada no projeto de cada um dos sistemas. A EMD suprime a influência do campo magnético através de um itinerário apropriado do fio condutor.

O sistema da BR supera a influência do campo magnético usando uma excitação de onda do carregador. A ASEA/SJ usa um sistema carregador para excitação de ponte. Um cabo blindado (RGU-174) é também usado para fazer a ligação elétrica dos circuitos de ponte.

O sistema é aterrado num ponto único para impedir circuitação por terra. A IITRI suprime a influência do campo magnético através do itinerário do fio condutor.

Condutividade, permeabilidade, massa e geometria do trilho podem

também ter influência no sinal de saída. Como resultado esses sistemas têm pontuação menor com respeito a esse fator.

2.2.10.16 Recuperação parcial dos dados para perda de um canal, nos sistemas multicanais.

Considera-se primeiro os sistemas de medição de carga. No sistema EMD, a perda de um canal de dados lateral ou vertical resulta na perda de uma medição contínua para aquela função de carga.

Técnicas de processamento de dados especiais podem ser usadas em outro canal, para obter dados na taxa de 5 a 6 pontos por rotação da roda.

No sistema BR um canal é usado para cada medição. Entretanto, se o canal de força longitudinal fosse perdido, a ponte de carga vertical não poderia ser compensada dos efeitos de interferência devidos à carga longitudinal.

O sistema AAR é multicanal para as medições de carga vertical. A perda de um canal reduziria a resolução espacial dessa carga.

A perda de um dos canais verticais no sistema ASEA/SJ resulta na perda de uma gravação de carga contínua. Um método alternativo de processamento de sinal pode ser usado para fornecer um sinal de saída quatro vezes por rotação da roda.

A perda de uma ponte de força lateral ou vertical no sistema IITRI resulta na perda de uma gravação contínua de carga para as funções de carga afetadas. Técnicas de processamento de dados especiais podem ser usadas para fornecer um sinal de saída de quatro a seis vezes por rotação da roda.

A perda da ponte de posição resulta numa leve perda na precisão para os dados verticais processados, e uma perda mais significativa na precisão para os dados laterais processados.

A perda do momento fletor ou dos canais de medição do adaptador de mancal no sistema Wyle resulta na perda de todos os dados de carga. Entretanto, se as pontes de momento fletor forem utilizadas em mais de uma orientação ao redor do eixo, a perda de uma dessas pontes ainda permite a derivação das cargas de roda em orientações específicas da rotação da roda.

Todos os sistemas têm pontuação igual com respeito a esse fator, num patamar de valor menor que o valor máximo da escala de avaliação.

2.2.10.17 Experiências dos sistemas em testes mais amplos, com respeito a qualidade dos dados, interpretação dos resultados, etc.

Considera-se primeiro os sistemas de medição de carga roda/trilho.

O sistema EMD e seu sistema antecessor têm sido usados desde 1962. A versão do sistema descrito nesse trabalho foi aplicada a um rodeiro de locomotiva.

Foi fabricado em 1977, e primeiramente usado em teste de campo em março de 1978. O sistema foi usado por mais de 8000 km de teste. Um dos principais usos tem sido o estudo da performance das locomotivas de quatro eixos com vários sistemas de suspensão.

Uma adaptação do sistema de medição de carga lateral da EMD foi usada nos testes de "truck" de eixo único e suporte articulado da FRA (Federal Railroad Administration) realizados em janeiro e fevereiro de 1981.

O desenvolvimento do sistema BR começou em 1972. Foi usado para estudos de comportamento do veículo em curvas e também em testes de estabilidade de vários veículos com velocidades acima de 200 km/h. em estudos da conferência dos pontos de mudança de linha e cruzamentos e em testes de desgaste de trilho.

Uma aplicação importante é seu uso no veículo de teste Decapod, onde o rodeiro é carregado vertical e lateralmente por cilindros hidráulicos. As hastes de tração podem também impor um ângulo de guinada no rodeiro.

Esse veículo foi usado para determinar força na via, mudança de trilho, subida de flange e desenvolvimento de ondulação no trilho.

O sistema AAR descrito, foi desenvolvido para a FRA (Federal Railroad Administration) em maio de 1974. O sistema foi usado na TTC (Transportation Test Center) para realizar experimentos no FAST (Facility for Accelerated Service Testing). Existe variação na ponte de força lateral devido a tensão induzida pela temperatura.

Também estão presentes na ponte lateral efeitos da força centrífuga dependente da velocidade.

Os primeiros trabalhos sobre o sistema ASEA/SJ foram relatados por Olson e Johnson em 1960. O sistema passou por vários estágios de desenvolvimento. Eriksson e Neligran incluíram em 1978 o sistema sensor de carga vertical já descrito.

O sistema foi usado com sucesso na Europa e EUA. Uma aplicação recente foi seu uso nos testes de via perturbada, patrocinados pela AAR e FRA.

Uma adaptação do sistema de medição de carga vertical da ASEA/SJ foi usada nos testes de "truck" de suporte articulado e eixo único realizados em janeiro e fevereiro de 1981.

A pesquisa do sistema de medição de carga da IITRI começou em 1976 e o sistema foi primeiramente usado num programa teste maior em 1977. O sistema de rodeiro da IITRI também foi usado num amplo programa de teste no FAST em 1979.

O programa de teste foi estruturado para obter os dados de carga

roda/trilho sob diferentes condições de operação, incluindo velocidade, força longitudinal do trem, características do carro, tipos de "truck", e estrutura de via.

O sistema foi usado também na TTC (Transportation Test Center) como parte do experimento de índice de desgaste de 1981.

O sistema de medição de carga Wyle que usa momentos fletores do eixo e adaptadores de mancal instrumentado foi usado por outros pesquisadores nos EUA e Europa.

Todos os sistemas de medição de carga têm pontuação igual com relação a esse fator, exceto o sistema AAR que não forneceu resultados aceitáveis.

Sua aplicação mais recente foi num programa de "hunting" (instabilidade lateral) de "truck" realizado na Divisão Califórnia da "Union Pacific" em 1977. O sistema também foi usado na TTC (Transportation Test Center) para os testes de veículo da MARTA (Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority) na via de teste da ferrovia. Algumas dificuldades foram causadas pelos níveis indesejáveis de vibração.

O sistema BR descrito, foi usado no experimento de índice de desgaste de 1981 na FAST (Facility for Accelerated Service Testing). O sistema Wyle foi desenvolvido e usado no programa TDOP (Truck Design Optimization Project) Fase II.

A seguir são mostradas as tabelas comparativas:

FATOR	MODELO						
	Valor de avaliação	EMB	BR	AAR	ASEA / SJ	IITRI	Wyle
3. Experiência Operacional							
a. Testes Principais	6	6	6	2	6	6	6
b. Dados de Calibração	3	2	3	3	2	3	2
c. Durabilidade	6	6	6	6	6	6	6
d. Repetibilidade	3	3	3	3	3	3	3
e. Tempo Médio entre falhas	3	3	3	3	3	3	3
f. Manutenção de Calibração	4	4	4	4	4	4	4
g. Calibração de Campo	4	4	4	4	4	4	4
h. Tempo de Começo	4	4	4	4	4	4	4
i. Resposta em Frequência	2	2	2	2	2	2	1,5

Tabela 3 - Experiência Operacional

FATOR	MODELO						
	Valor de avaliação	EMB	BR	AAR	ASEA / SJ	IITRI	Wyle
4. Processamento de Dados							
a. Gravação A ou D (analógico ou digital)	2	2	2	2	2	2	2
b. Processamento A ou D	2	2	2	2	2	2	2
c. Ruído Elétrico	3	2	2	2	2	2	1
d. Capacidade de Tempo Real	5	5	5	3	5	5	5
e. Limitações de Tempo Real	2	2	2	2	2	2	2
f. Resolução Espacial	2	2	2	1	2	2	2
g. Formatação dos Dados	2	2	2	2	2	2	2
h. Limitações de Precisão	2	1,5	1,5	1,5	1,5	2	1,5
TOTAL (Tab. 1 + Tab. 2 + Tab. 3 + Tab. 4)	100	93,5	96,0	84,0	92,5	94,5	82,0

Tabela 4 - Processamento de Dados e Somatória da Avaliação

FATOR	MODELO						
	Valor de avaliação	EMB	BR	AAR	ASEA / SJ	II TRI	Wyle
1. Fatores de Aplicação							
a. Limitações de Tipo de Truck	3	3	3	3	3	3	3
b. Limitações do Tipo de Roda	2	2	1,5	2	2	2	2
c. Limitações Ambientais	3	3	3	3	3	3	3
d. Manutenção	2	2	2	2	2	2	2
e. Reparo em Campo	2	2	2	2	2	2	2
f. Necessidade de Ferram. Especiais	2	2	2	2	2	2	2
g. Tempo de Vida Esperado	2	2	2	2	2	2	2
h. Substituição de Componentes	2	2	2	2	2	2	2
i. Monitoração de Performance	2	2	2	2	2	2	2
j. Integração dos Subistemas de Carga e Posição	3	3	3	3	3	3	3
l. Necessidade de Condicionamento de Sinal Especial	2	2	2	2	2	2	2

Tabela 1 - Fatores de Aplicação

FATOR	MODELO						
	Valor de avaliação	EMB	BR	AAR	ASEA / SJ	II TRI	Wyle
2. Fatores Analíticos							
a. Comprimento do Sinal	4	3	3	3	3	3	3
b. Interferência	4	3	4	2	4	4	3
c. Sensibilidade da Posição de Carga	4	3	4	3	3	4	3
d. Outras Influências Sobre a Saída	4	4	4	2	2	4	4
e. Limitações de Sinal Reduzido	4	3	3	3	3	3	3

Tabela 2 - Fatores Analíticos

TABELA 5

Características de saída de ponte de sistema de medição de carga, aplicados a rodas de alma reta.

CARACTERÍSTICA DE PONTE	Saída do sistema, deform. média por extensômetro (u m/m)			
	EMD	AAR	ASEA/SJ	IITRI
<u>Resposta de ponte básica</u>	(tensão média)/extens. na ponte vertical, com carga vertical de 4,4 kN. Local de aplicação da carga:			
A 25,4 mm para dentro.....	-1,53	-8,50	-4,47	-3,24
na "tape line".....	-1,53	-9,76	-4,63	-3,16
a 25,4 mm para fora.....	-1,53	-11,0	-4,39	-3,10
<u>Efeitos de interferência da carga lateral sobre a vertical</u>	(tensão média)/extens. na ponte de carga lateral com carga lateral de 4,4 kN			
	-29,0	-8,27	-6,93	-45,8
<u>Efeitos de interferência da posição da carga vertical sobre a lateral</u>	(tensão média)/extens. na ponte lateral, com carga vertical de 4,4 kN. Local de aplicação da carga:			
a 25,4 mm para dentro.....	2,06	0,917	-1,10	-3,28
na "tape line".....	3,53	-0,010	-1,08	5,47
a 25,4 mm para dentro.....	5,06	-0,875	-1,07	7,78
EFEITOS DE INTERFERENCIA RELATIVA	VARIAÇÃO DA CARGA INDICADA			
Variação da carga vertical (no "tape line") indicada, com relação à carga lateral unitária (N/N)	-0,098	-1,95	0,281	0,0
Variação da carga lateral indicada, para um movimento de 25,4 mm de uma carga vertical de 142 kN (kN)				
da "tape line" até 25,4 mm para dentro....	7,2	-16	-0,4	6,8
da "tape line" até 25,4 mm para fora....	-7,5	14,9	0,2	-7,2

TABELA 6

Características de saída de ponte de sistema de medição de carga, aplicados a rodas de alma curva.

CARACTERÍSTICA DE PONTE	Saída do sistema, deform. média por extensômetro (u m/m)			
	EMD	AAR	ASEA/SJ	IITRI
<u>Resposta de ponte básica</u>	(tensão média)/extens. na ponte vertical, com carga vertical de 4,4 kN. Local de aplicação da carga:			
A 25,4 mm para dentro.....	-2,31	-10,1	-3,34	-4,98
na "tape line".....	-2,34	-10,9	-3,22	-5,10
a 25,4 mm para fora.....	-2,41	-11,8	-3,40	-5,14
<u>Efeitos de interferência da carga lateral sobre a vertical</u>	(tensão média)/extens. na ponte de carga lateral com carga lateral de 4,4 kN			
	-32,1	-9,07	-12,2	-24,3
<u>Efeitos de interferência da posição da carga vertical sobre a lateral</u>	(tensão média)/extens. na ponte lateral, com carga vertical de 4,4 kN. Local de aplicação da carga:			
a 25,4 mm para dentro.....	3,13	-0,052	0,552	3,75
na "tape line".....	4,75	-0,573	0,250	5,72
a 25,4 mm para dentro.....	6,47	-1,167	-0,094	8,06
EFEITOS DE INTERFERENCIA RELATIVA	VARIAÇÃO DA CARGA INDICADA			
Variação da carga vertical (no "tape line") indicada, com relação à carga lateral unitária (N/N)	-0,107	0,0	-0,109	0,0
Variação da carga lateral indicada, para um movimento de 25,4 mm de uma carga vertical de 142 kN (kN)				
da "tape line" até 25,4 mm para dentro....	7,2	-8,2	3,5	11,5
da "tape line" até 25,4 mm para fora.....	-7,7	9,4	-4,0	-13,7

2.3 CONCLUSÕES SOBRE OS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Um sistema de roda instrumentada deve ser utilizado caso normas de performance tenham que ser atendidas. A precisão desejada não pode ser atingida com uma célula de carga adaptada ao mancal da roda, ou com um sistema de momento de flexão do eixo[4].

Os sistemas de roda instrumentada EMD, ASEA/SJ e IITRI satisfazem aos requisitos de medição de força vertical.

Os sistemas de roda instrumentada EMD e IITRI satisfazem aos requisitos de medição de força lateral fornecidos. Um método está incluído no sistemas EMD e IITRI para corrigir os efeitos de variação da posição lateral do carregamento vertical.

As características do sistema de roda instrumentada, raiada, da BR, permitem encontrar os requisitos de performance desejados. Este sistema é, provavelmente, o mais caro pelos custos de usinagem e instrumentação da roda raiada.

Os sistemas de contato com o trilho (AAR e BR) podem, dependendo de maior desenvolvimento, se aproximar das características desejadas.

O sistema, de não contato Wyle, requer um maior desenvolvimento para que as características de performance desejadas sejam cumpridas.

3 - SISTEMA DE RODEIRO INSTRUMENTADO DESENVOLVIDO

3.1 ESCOLHA DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO

Foi feita uma análise cuidadosa de alguns modelos em uso atualmente, considerando os esforços medidos, o posicionamento dos extensômetros e os resultados obtidos. Nesse primeiro estudo, realizou-se uma observação abrangente do sistema de transmissão, condicionamento e tratamento dos sinais gerados.

Conforme foi abordado no capítulo anterior, existem duas tecnologias de instrumentação de rodeiros para determinação dos esforços de contato roda/trilho, que são: instrumentação do eixo ou instrumentação das rodas. Cada sistema tem as suas vantagens e desvantagens; sendo assim, a escolha foi baseada na facilidade de construção e utilização racional. Como exemplos temos a Ferrovia Alemã que instrumenta o eixo, em algumas seções, determinando as componentes verticais e laterais a partir destas medições, também usa este sistema o laboratório Wyle do Colorado-U.S.A. Já os sistemas utilizados pelas ferrovias japonesa, francesa, inglesa, sueca e americana (EMD, AAR e IITRI), é a instrumentação da roda, obtendo os esforços diretamente desta medida.

Após a análise dos sistemas utilizados nos diversos países, optou-se pela instrumentação da roda, sendo os principais motivos:

- 1) Possibilidade de medição da posição lateral de contato roda/trilho para avaliação do "hunting" (instabilidade lateral).
- 2) Medição dos esforços próximos ao ponto de contato roda/trilho, e portanto menor erro devido a dinâmica do sistema.
- 3) Maior aplicação em outros países, propiciando mais informações sobre o tipo de transmissão, condicionamento e tratamento dos sinais gerados, assim como uma melhor avaliação dos dados obtidos.

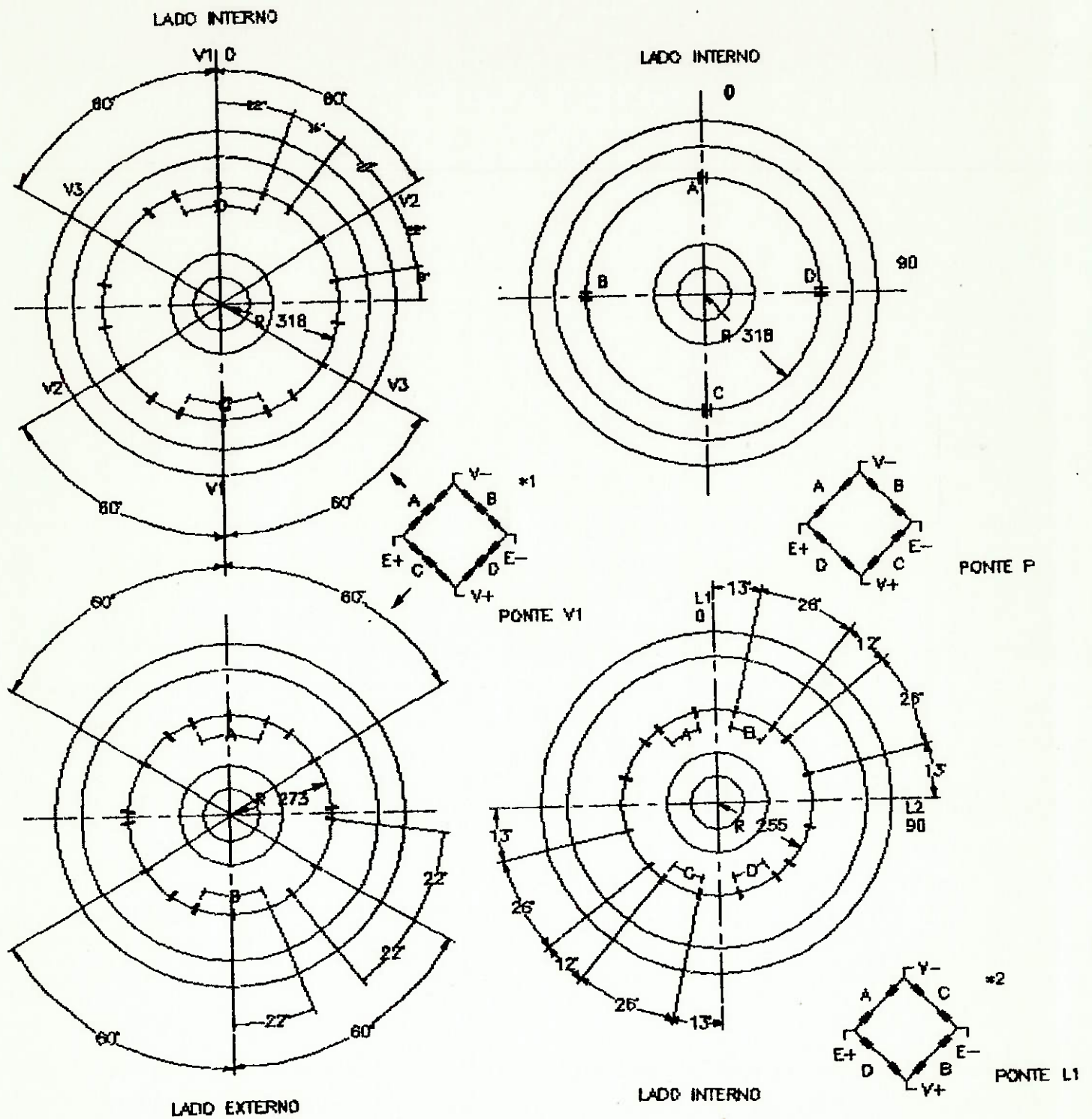
3.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA PARTE MECÂNICA

Nessa fase cuidou-se do projeto mecânico, detalhando o posicionamento dos extensômetros, as usinagens necessárias e os posicionamentos dos instrumentos para ampliação e transmissão dos sinais. O extensômetro de contato foi usado na definição dos pontos de máxima tensão, para efeito do posicionamento dos extensômetros.

Também nessa fase, especificou-se a roda e o eixo utilizados, levando em conta os modelos em uso nas nossas ferrovias.

3.2.1 Tecnologia desenvolvida

O sistema de rodeiro instrumentado escolhido baseia-se no desenvolvimento do IITRI (Instituto Illinois de Tecnologia) que utiliza o tipo alternado de ponte de Wheatstone (constituída de extensômetro elétrico), para captar dois carregamentos, vertical e transversal de contato roda/trilho. Juntamente, um terceiro tipo de ponte é usado para fornecer indicação da posição da linha-de-ação do carregamento vertical sobre a banda de rodagem. A posição radial dos extensômetros nas pontes são baseadas num levantamento experimental de distribuição de tensões na superfície da alma da roda (com extensômetro de contato) usando como parâmetro as posições obtidas pela IITRI, as quais resultam de esforços transversais e verticais na interface roda/trilho. Seis pontes de extensômetros são usadas em cada roda. Três (defasadas em 60 graus) são designadas como pontes verticais e fornecem os esforços verticais, duas (defasadas em 90 graus) designadas pontes laterais e uma de posição (dois extensômetros a cada 90 graus ligados em ponte completa) (Figura 3.1). Como nos modelos da AAR e EMD, optou-se por não fazer correção do erro devido ao "efeito cruzado" (influência do esforço lateral na medida do esforço vertical e vice-versa) através do software. Este erro foi minimizado pelo posicionamento dos extensômetros.



NOTA:

- #1 - AS PONTES V2 E V3 SAO IGUAIS A PONTE V1 APENAS DEFASADAS EM 60 E 120 GRAUS
- #2 - A PONTE L2 E IGUAL A PONTE L1 APENAS DEFASADA EM 90 GRAUS

Figura 3.1: Configuração da ponte de extensômetros para o sistema desenvolvido

3.2.2 Veículo do primeiro protótipo

O veículo utilizado para implementação do primeiro protótipo foi um carro de passageiros de fabricação MAFERSA da série 8000, com suspensão a ar e mancal de rolamento interno às rodas. O veículo faz parte do patrimônio da FEPASA (Ferrovia Paulista S/A) e embora não tendo problemas de desempenho, foi escolhido por já ter participado de uma série de testes (através de um convênio FEPASA/IPT) para determinação da velocidade crítica, onde foram levantados parâmetros (acelerações, movimentos relativos e filmagens do ponto de contato roda/trilho) para caracterização de seu comportamento dinâmico em altas velocidades. Estes dados serviram de subsídio para a avaliação do desempenho do rodeiro instrumentado.

A roda instrumentada, a mesma do veículo, foi a B36 (914mm de diâmetro) de aço forjado. Uma das razões da escolha da tecnologia usada pelo IITRI foi a não restrição quanto ao tipo de roda; o modelo francês, por exemplo, usa uma roda de alma reta.

A construção do rodeiro envolveu interessados em sua utilização, diminuindo seus custos e agilizando os trabalhos.

3.2.3 Usinagem da roda

As rodas foram usinadas nas suas duas faces, numa região de maior sensibilidade (definida através do extensômetro de contato), para garantir o paralelismo e a homogeneidade da superfície e aumentar a sensibilidade (maior deformação dos extensômetros por carga aplicada) através da diminuição da seção transversal (Foto 1).

3.2.4 Definição do posicionamento dos extensômetros

O estudo de distribuição de tensões, para efeito do posicionamento radial das pontes de extensômetros a roda, foi feito através de extensômetro de contato (Figura 3.2). Este instrumento tem a capacidade de fazer as medições das tensões sem a necessidade de fixação (colagem ou soldagem) do sensor na estrutura a ser medida.

É composto de um extensômetro colado a uma borracha posicionada em uma haste, que está apoiada em uma mola. O funcionamento consiste em posicionar a borracha no ponto da estrutura onde se quer medir a tensão. A estrutura é submetida a uma carga cíclica, que provoca uma variação proporcional do sinal de saída do extensômetro colado à borracha. Este sinal é relacionado com a força média aplicada.

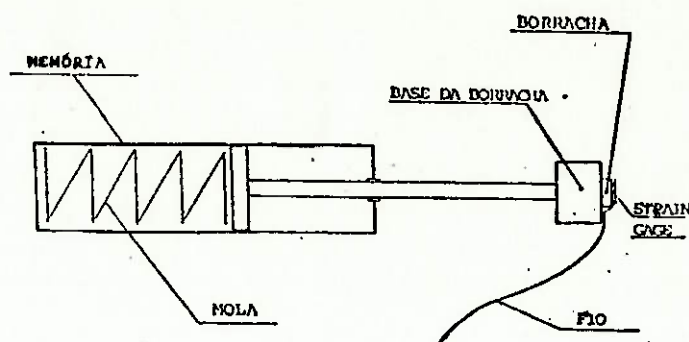


Figura 3.2: Extensômetro de contato

No caso da roda ferroviária, o interesse estava na intensidade das tensões radiais na alma da roda em função dos esforços verticais, laterais e da posição de contato roda/trilho. No caso, não havia interesse na determinação do valor absoluto das cargas aplicadas, e sim nos pontos de maior deformação (sensibilidade), relativos aos esforços aplicados.

Considerando que o extensômetro mede a deformação específica e que as tensões são diretamente proporcionais à deformação, pode-se fazer o levantamento, relacionando a posição radial na roda com o sinal do extensômetro de contato, para cada esforço unitário aplicado (Figura 3.3).

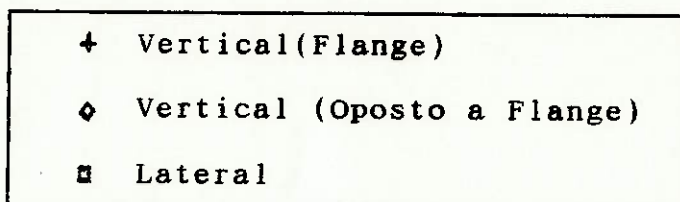
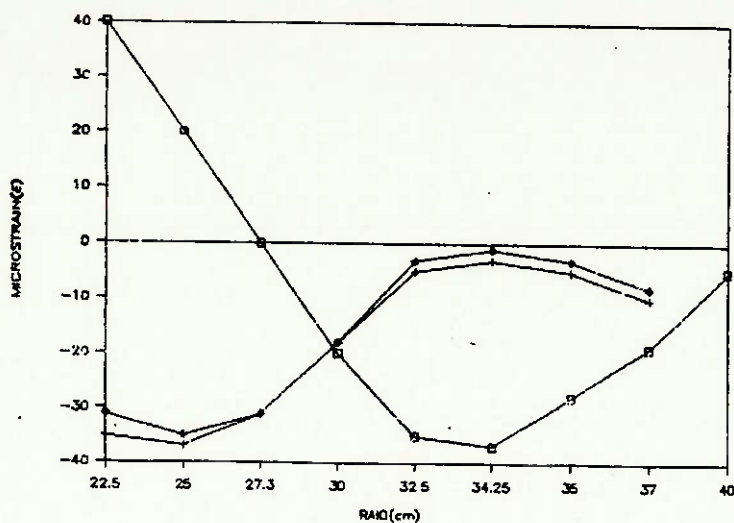


Figura 3.3: Gráfico: x Raio

O ensaio foi realizado no mesmo equipamento utilizado na calibração do sistema (Figura 3.4, Foto 14). Era constituído de dois segmentos de trilhos montados em um quadro de reação, onde foi posicionado o rodeiro. Dois atuadores aplicavam cargas verticais nos mancais de rolamento e um aplicava carga lateral, paralela ao eixo do rodeiro. Era possível, também, variar a posição lateral do contato roda/trilho.

Para determinar o ponto de maior sensibilidade na alma da roda, quanto a atuação da carga vertical, foi aplicado um esforço vertical cíclico no mancal de rolamento, próximo à roda estudada, e no outro mancal, o atuador garantia uma reação próxima de zero para roda oposta. Então, com um extensômetro de contato era feito um mapeamento das tensões radiais para determinação do ponto de máxima deformação, onde foram posicionados radialmente os extensômetros das três pontes verticais.

O levantamento para a carga lateral era feito aplicando-se esforços paralelos ao eixo, cuja reação era na flange da roda estudada. Com o extensômetro de contato era feito um mapeamento das deformações

na alma da roda para posicionamento das pontes laterais.

O mapeamento para efeito do posicionamento radial da ponte de posição era feito, variando o posicionamento lateral de contato roda/trilho.

Como podemos observar na figura 3.3, o posicionamento radial das pontes verticais no lado externo da roda (27,3 cm, Figura 3.1) foi estabelecido, considerando a deformação específica (ϵ) do extensômetro de contato igual a zero para uma carga lateral unitária e uma menor interferência do posicionamento lateral da roda, observada pela variação da deformação específica (ϵ) para a carga vertical aplicada junto a flange e oposto a flange. A posição radial para as outras pontes, foram determinadas adotando-se o mesmo critério, tanto do lado externo como do lado interno da roda.

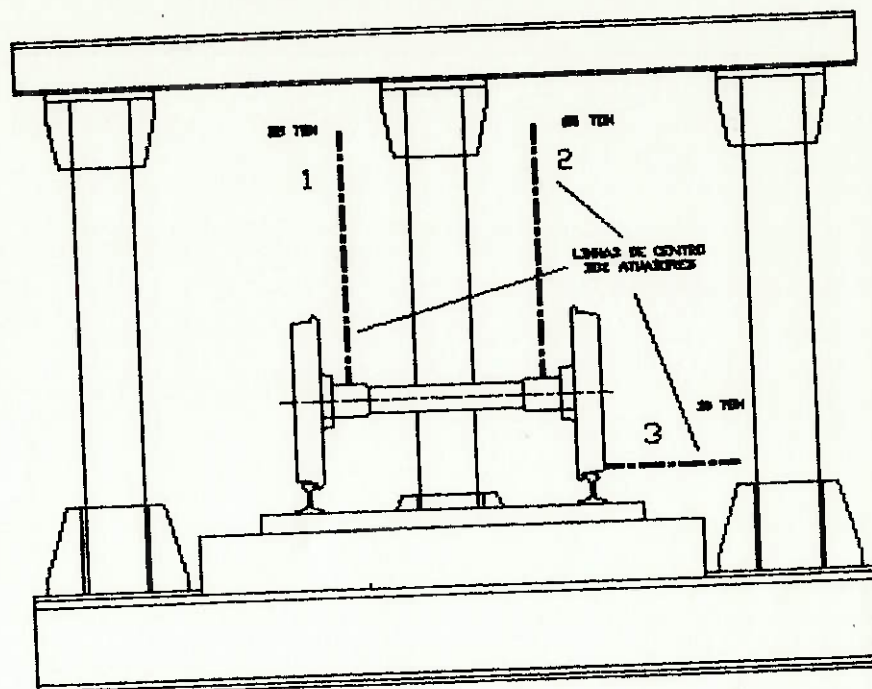
3.2.5 Instrumentação da roda

Nesta etapa foi estudado, analisado e definido qual o método a ser empregado na instrumentação da roda.

O sensor utilizado foi o extensômetro marca KYOWA, com grade de 10mm e resistência de 350 ohms. Foi usada esta resistência, ao invés de 120 ohms, pela possibilidade da alimentação ser feita com uma tensão maior, minimizando com isso as interferências.

O adesivo mais adequado para este tipo de transdutor é aquele à base de epóxi, sendo utilizado o adesivo MBOND 610 da Micro Measurements. Para ser viável a utilização deste adesivo, foi necessário construir um dispositivo mecânico (Foto 5) que através de molas, aplicasse forças determinadas sobre cada extensômetro, individualmente, durante o processo de cura. Para a cura do adesivo foi necessário uma estufa(forno) de grandes dimensões, fazendo com que a roda toda fosse aquecida de maneira uniforme.

VISTA LATERAL DO QUADRO DE REACAO



VISTA FRONTAL DO QUADRO DE REACAO

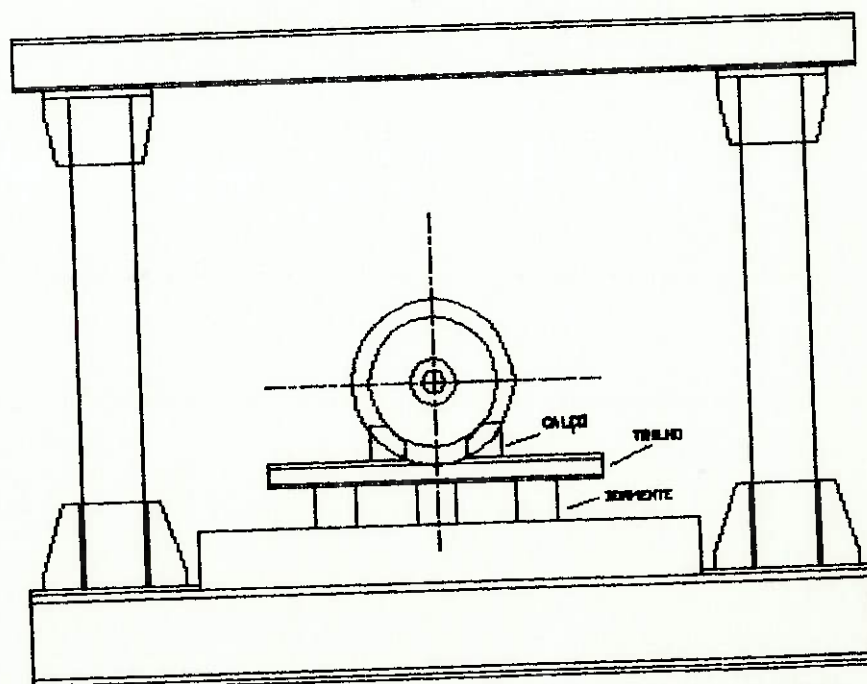


Figura 3.4: Estrutura de calibração

A colagem dos extensômetros foi realizada em sala fechada com ar condicionado central. Tomou-se o cuidado para evitar a contaminação da superfície.

Depois de colados os extensômetros, foi montado o dispositivo com molas. Em seguida a roda foi transportada até o forno e aplicados os ciclos de cura e pós-cura. Após esse processo, foi feita toda a fiação elétrica conectando cada extensômetro à sua respectiva ponte (vertical, lateral e de posição), tudo devidamente protegido contra umidade e impactos.

3.2.6 Condicionamento do sinal

Foi definido que os sinais provenientes dos extensômetros seriam amplificados na própria roda, para minimizar os problemas de ruídos devido a pequena amplitude dos sinais e transmitidos por um dispositivo com anéis deslizantes (Slip Ring). A outra parte do condicionador ficou no vagão.

Foram especialmente construídos seis canais de condicionadores para cada roda. A excitação de 20 volts foi comum para todas as seis pontes da roda e o ganho fixo para cada canal (Figura 3.5). Os seis canais foram construídos em uma única placa de circuito impresso envolvida com uma camada de elastômero à base de silicone, para evitar danos devido à vibração. Faz parte do condicionamento, um filtro analógico passa baixa, de 100 Hz, para cada canal.

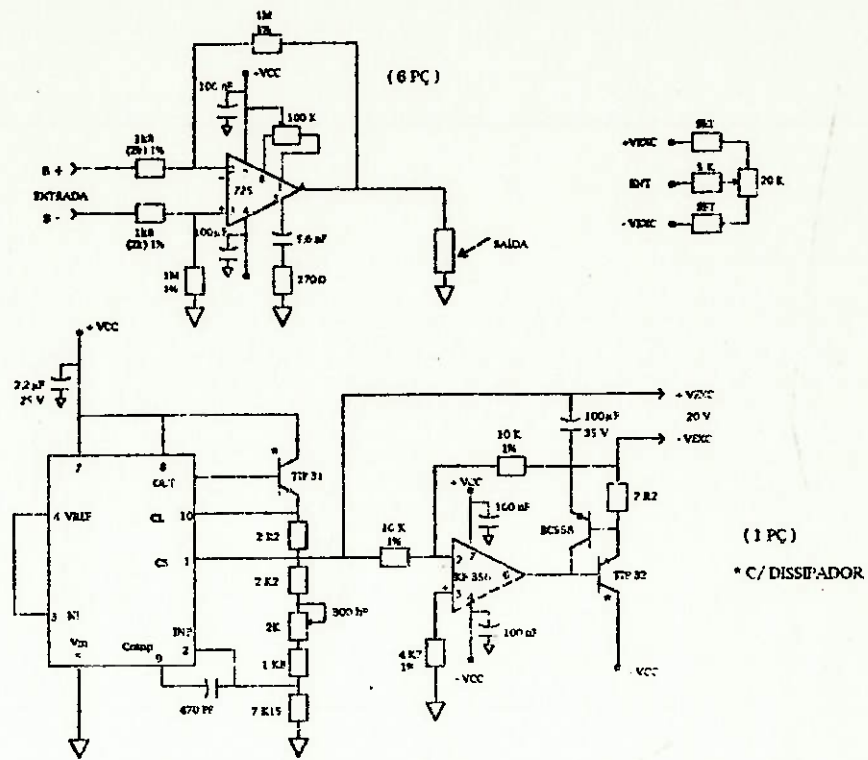
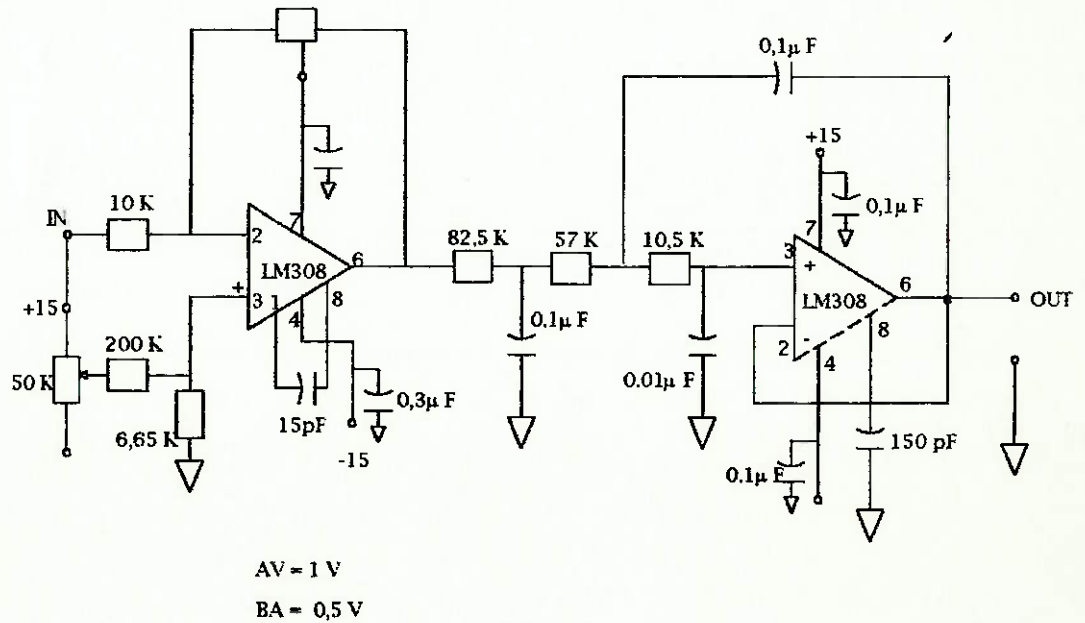


Figura 3.5: Esquema do Condicionador (amplificador)



AV = 1 V
BA = 0,5 V

Figura 3.6: Esquema do Condicionador(filtro analógico)

3.3 DESENVOLVIMENTO DOS INSTRUMENTOS DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE SINAIS

Com o condicionamento de sinal definido, iniciou-se o desenvolvimento do sistema de aquisição e tratamento dos sinais, onde a preocupação foi, além da fidelidade entre as forças envolvidas e os sinais gerados, também a racionalização dos instrumentos, compatibilizando o projeto com os materiais e sistemas de similar nacional.

No caso do sistema desenvolvido pelo IITRI (Instituto Illinois de Tecnologia), os doze sinais gerados nas duas rodas são aquisitados e tratados em tempo real (três pontes verticais, duas laterais e uma de posição, para cada roda). Esses sinais são combinados para determinar as cargas e posição de contato roda/trilho.

3.3.1 Aquisição e processamento dos sinais do rodeiro desenvolvido

A aquisição dos dados foi feita através de uma placa A/D (10 bits) e um software específico. Os sinais provenientes dos condicionadores são inseridos na interface de conversão analógico/digital (placa A/D), que está instalada num conector de expansão do microcomputador, tendo a função de transformar os sinais analógicos provenientes dos condicionadores de sinais em dados digitais, forma esta em que podem ser manipulados e armazenados pelo computador. O software executa a reprodução dos sinais, a aquisição e o armazenamento dos sinais na sua forma digital. A placa e o software foram fornecidos por uma empresa nacional (LYNX).

Para processamento dos sinais foi desenvolvido um programa em linguagem Turbo Pascal, que acessa os dados armazenados pelo programa de aquisição e cria um arquivo com os dados já tratados. Os sinais das pontes são ajustados, um a um, através de equacionamentos, baseados em dados de calibração. Posteriormente os sinais das pontes são combinados para determinação das suas respectivas cargas. Uma listagem do programa é apresentada a seguir:

```

Program Rodeiro1;
uses Crt,Dos,Acesso;

```

```

type
  DadosPerfil=record
    Km:real;
    L1sV1:real;
    L2sV2:real;
  end;

  DadosInteiros=record
    km:integer;
    L1sV1:integer;
    L2sV2:integer;

  end;

```

```

var
  DadosConfig :TpTemaDadosAD;
  dp           :dadosperfil;
  di           :dadosinteiros;
  T,
  S,
  SFim,
  SInic,
  dado,
  dadoAnt,
  DeltaT      :real;
  arqin,
  arqout      : string [25];
  ArqE        : string [25];
  aout        : file;
  ain         : text;
  sai         : boolean;
  sint,
  opcao      :integer;

  Rodeiro    : text;
  roda,
  Q,
  Cont       : char;
  i,
  j,
  k,
  Ci,
  SM,
  SalvaPos,
  acel_vertical,
  acel_transv : integer;
  Inicio ,
  Fim,
  Ev11,
  Ev12,
  Ev13,
  El11,
  El12,

```



```

Ev21,
Ev22,
Ev23,
E121,
E122,
EP1,
EP2,
L1sV1,
L2sV2,
V11,
V12,
V13,
V21,
V22,
V23,
L11,
L12,
L21,
L22,
s1,
s2,
l1,
l2,
L2A,
L1A,
VelAnt,
Vel,
v1,
V2          : real;
pin,
pf,
posicao,
PosAnt,
PosAt,
PosFut,
EpxCalc,
Epx,
EpxFut,
EpxAnt      : real;
First,
Min,
Max          : boolean ;
ArqS         : string [20];
letra        : char;
FileADTemS   : file;
TemDadosADs : TpTemDadosAD;
CnADa        : CanaisEntradaTem;
Lst          : Text;
intL1:integer;
intL2:integer;
intV1:integer;
intV2:integer;
intVel:integer;

(=====)
(===      Equacoes      ===)
(=====)
Procedure Equacoes;
  Begin

```

```

L11:=2.098567*abs(EL11) - 0.03722;
L12:=1.995622*abs(EL12) + 0.43063;
V11:=-13.829*abs(EV11)+1.21;
V12:=1.462-14.21*abs(EV12);
V13:=1.438-14.55*abs(EV13);
V1:=abs(V11)+abs(V12)+abs(V13);
L1:=sqrt(sqr(L11)+sqr(L12));
L22:=(2.207222*abs(EL22)) + 0.051461;
L21:=(2.203138*abs(EL21)) + 0.023927;
V21:=(-12.39*abs(EV21)) + 0.8494;
V22:=(-12.26*abs(EV22)) + 0.1542;
V23:=(-12.22*abs(EV23)) + 0.4616;
V2:=abs(V21)+abs(V22)+abs(V23);
L2:=sqrt(sqr(L21)+sqr(L22));
if L1 > L2 then
begin
  L2A:=-1 * L2;
  L1A:= L1;
end;
if L1 < L2 then
begin
  L1A:=-1 * L1;
  L2A:= L2;
end;
if L1 = L2 then
  if (L1A > 0) or (L2A < 0) then L2A:= L2 * -1
  else
    L1A:= L1 * -1;
L1:= L1A;
L2:= L2A;
L1sV1:= L1/V1;
L2sV2:=L2/V2;
End;

```

```

{*****}
*
* PROCEDIMENTO: Integral
*
* FUNCAO      : Calcula a integral de dado em um intervalo de tempo.
                O resultado da integral e armazenado em s e a
                integral e retrograda(diminui valor de s).
* PARAMETROS ENTRADA:- dado:
* PARAMETROS SAIDA:
* DATA       : 19-11-92
* VERSAO      : 1.2 (Turbo Pascal)
*
{*****}
Procedure integral;
Begin
  if T (<) inicio then
    begin
      s2:= s2 +((vel + velAnt)*DeltaT)/(7.2);
      velAnt:=vel;
    end
  else
    begin
      s2:=0;
    end
end;

```

```

                velant:=vel;
            end;
End;

(=====)
(==Acesso aos Sinais dos Sensores e Calculo das Tensoes Resultantes==)
(=====)
Procedure Tensoes;
    Begin
        Ev1:=DadoR(0);           (* Acessa, atraves da rotina DadoR, os valores correspon-*)
        Ev12:=DadoR(1);         (* dentes a EV1,EV2,EV2,EL1,EL2 e EP e calcula suas "re- *)
        Ev13:=DadoR(2);         (* sultantes" EL, EV e EP. *)
        Ep1:=abs(DadoR(3));
        El11:=DadoR(4);
        El12:=DadoR(5);
        Ev21:=DadoR(6);
        Ev22:=DadoR(7);         (* dentes a EV1,EV2,EV2,EL1,EL2 e EP e calcula suas "re- *)
        Ev23:=DadoR(8);         (* sultantes" EL, EV e EP. *)
        Ep2:=abs(DadoR(9));
        El21:=DadoR(10);
        El22:=DadoR(11);
        Vel:=DadoR(12);
        acel_transv:=DadoB(13);
        acel_vertical:=DadoB(14);
        Integral;
        Equacoes;
    End;

```

```

(=====)
*
* PROCEDIMENTO: Configura
*
* FUNCAO      : Configura os canais a serem criados e grava
                configuracao no arquivo .TEM.
*
* PARAMETROS ENTRADA:
* PARAMETROS SAIDA:
* DATA       : 19-11-92
* VERSAO      : 1.0 (Turbo Pascal)
*
(=====)
procedure CONFIGURA;
var i:integer;
begin
    DadosConfig:=TemDadosAD;
    with Dadosconfig do begin
        with cnad[0] do begin
            nome:='espaco';
            unidade:='m';
            LimMax:=50000;
            LimMin:=-100;
            usado:=true;
            end;
        with cnad[1] do begin
            nome:='LisV1';
            unidade:='r';
            LimMax:=3;
            LimMin:=-3;
            usado:=true;

```

```
end;
with cnad[2] do begin
  nome:='L2sV2';
  unidade:='r';
  LimMax:=3;
  LimMin:=-3;
  usado:=true;
end;
with cnad[3] do begin
  nome:='L1';
  unidade:='ton';
  LimMax:=8;
  LimMin:=-8;
  usado:=true;
end;
with cnad[4] do begin
  nome:='V1';
  unidade:='ton';
  LimMax:=15;
  LimMin:=0;
  usado:=true;
end;
with cnad[5] do begin
  nome:='L2';
  unidade:='ton';
  LimMax:=8;
  LimMin:=-8;
  usado:=true;
end;
with cnad[6] do begin
  nome:='V2';
  unidade:='ton';
  LimMax:=15;
  LimMin:=0;
  usado:=true;
end;
with cnad[7] do begin
  nome:='vel';
  unidade:='km/h';
  LimMax:=120;
  LimMin:=0;
  usado:=true;
end;
with cnad[8] do begin
  nome:='Acel.Transv.';
  unidade:='m/seg2';
  LimMax:=2.500;
  LimMin:=-2.500;
  usado:=true;
end;
with cnad[9] do begin
  nome:='Acel.Vertical';
  unidade:='m/seg2';
  LimMax:=5.000;
  LimMin:=-5.000;
  usado:=true;
end;
for i:=10 to 31 do
  begin
    cnad[i].usado:=false;
```

```

        cnad[i].nome:='Volts ';
    end;
    nocnativos:=10;

    end;

```

```

    blockwrite(aout,dadosconfig,sizeof(tptemdadosad));

```

```

end;

```

```

{*****}
*
* PROCEDIMENTO: GravaDados
*
* FUNCAO      : Calcula e grava os dados transformados para inteiro
               no arquivo .TEM.
*
* PARAMETROS ENTRADA:
* PARAMETROS SAIDA:
* DATA      : 19-11-92
* VERSAO     : 1.0 (Turbo Pascal)
*
{*****}
    procedure GRAVADADOS;
    begin
        dp.l1sv1:=l1sv1;
        dp.l2sv2:=l2sv2;
        with di do begin
with dadosconfig.cnad[0] do
    sint:=trunc((int(s2) - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[1] do
    L1sV1:=trunc((dp.L1sV1 - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[2] do
    L2sV2:=trunc((dp.L2sV2 - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[3] do
    intL1 :=trunc((L1 - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[4] do
    intV1:=trunc((V1 - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[5] do
    intL2:=trunc((L2 - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[6] do
    intV2 :=trunc((V2 - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
with dadosconfig.cnad[7] do
    intVel :=trunc((Vel - LimMin)/((LimMax - LimMin)/65536.0)-32768.0);
        end;
        blockwrite(aout,sint,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,di.L1sV1,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,di.L2sV2,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,intL1,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,intV1,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,intL2,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,intV2,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,intVel,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,acel_transv,sizeof(integer));
        blockwrite(aout,acel_vertical,sizeof(integer));
    end;
end;

```



```

# PARAMETROS SAIDA:
# DATA      : 19-11-92
# VERSAO    : 1.0 (Turbo Pascal)
#
#####
procedure DEFAULT;
begin
  ArqOut:='rdcaju3';
  ArqE:='rdcaju03';
  sfi:=200000;
  sinic:=0;
end;

```

```

#####
(***)      PROGRAMA PRINCIPAL      (***)
#####
begin

  s1:=0;
  s2:=0;
  inicio:=0;
  ArqTpCnf:=False;
  TELA;

  gotoXY(1,6);
  Writeln('      ARQUIVOS DE ENTRADA E SAIDA. ');
  Writeln;
  Writeln('      -Escolhe Arquivos  -> 1');
  Writeln('      -Default           -> 2');
  Write('                        opcao : ');
  gotoXY(13,21);
  Write('Digite 1 para escolher arquivos      ');
  gotoXY(13,22);
  Write('Digite 2 para "default". O "default" pode ');
  gotoXY(13,23);
  Write(' ser modificado dentro do programa CRIATEM.PAS ');
  gotoXY(41,10);
  readln(opcao);
  ClrScr;
  TELA;
  if opcao <> 2 then
  begin
    gotoXY(1,6);
    Write('      ARQUIVO DE SAIDA DE DADOS  : ');
    gotoXY(13,21);
    Write('Digite o nome do arquivo a ser gerado, ');
    gotoXY(13,22);
    Write(' sem extensao. ');
    gotoXY(13,23);
    Write(' ');
    gotoXY(41,6);
    Readln(arqout);

    Writeln;
    Write('      ARQUIVO DE DADOS DO ENSAID  : ');
    gotoXY(13,21);

```

```

Write('Digite diretorio e nome do arquivo ');
gotoXY(13,22);
Write(' de ensaio, sem extencao. ');
gotoXY(13,23);
Write(' ');
gotoXY(41,8);
Readln(ArqE);

Writeln;
Writeln('          POSICAO INICIAL DO TREM      ');
gotoXY(13,21);
Write('Digite a posicao inicial do trem. ');
gotoXY(13,22);
Write('(dados em metros). Essas posicoes devem ser ');
gotoXY(13,23);
Write('compativeis com o Arquivo de Entrada de Dados ');
gotoXY(41,10);
Readln(Sinic);
end
else begin
    DEFAULT;
    gotoXY(1,6);
    Writeln('          ARQUIVO DE SAIDA DE DADOS      ',
           'ArqOut, '.TEM');

    Writeln;
    Writeln('          ARQUIVO DE DADOS DO ENSAIO    ',
           'ArqE, '.TEM');

    end;

(=====)
(===  Abertura de Arquivos  ===)
(=====)
AbreArquivo(ArqE);

Assign(aout,arqout+'.TEM');
Rewrite(aout,1);

(=====)
(===  Inicializacao  ===)
(=====)
CONFIGURA;
DeltaT:=1/TemDadosAD.freqAmostr;
primdado(0);
T:=tempo;
s:=Sinic;

(=====)
(===  Processamento  ===)
(=====)
gotoXY(13,21);
Write(' ');
gotoXY(13,21);
Write('Criando arquivo ',arqout, '.TEM. ');
gotoXY(13,22);
Write(' ');
gotoXY(13,23);
Write(' ');

```



```

gotoXY(1,15);
Writeln('                ');
Writeln('                PROCESSANDO... ');
Writeln('                ');

```

```

LEDADOINICIAL;
gotoXY(1,25);
While (not FimDados)
do
begin
    Tensoes;
    GRAVADOS;
    ProxDado;
    t:=tempo;
end;

```

```

{=====}
{===  Fechamento de Arquivos  ===}
{=====}

```

```

FechaArquivo;
close(aout);

```

```

gotoXY(1,15);
Writeln('                ');
Writeln('                ...TERMINADO ');
Writeln('                ');
gotoXY(13,21);
Write('Criado arquivo ',arqout,'.TEM. ');

```

```

gotoXY(1,25);
Sound(450);
Delay(220);
NoSound;

```

```

End. {fim programa Criate}

```

O equacionamento dos sinais gerados para determinação das forças de interação roda/trilho foram determinados da seguinte forma:

3.3.2 Passos para determinação do Y/Q (fluxograma a seguir)

- 1) Aquisição dos sinais das pontes de extensômetros, gerados nas duas rodas, que são: V11, V21, V31, L11, L21 e V12, V22, V32, L12, L22. Os sinais são gravados em disco rígido, junto com a velocidade medida através do tacômetro de pulsos, onde: V11, V21 e V31 são sinais das pontes verticais para a roda 1; L11 e L21 são sinais das pontes laterais para roda 1; V12, V22 e V32 são sinais das pontes verticais para a roda 2 e L21 e L22 são sinais das pontes laterais para a roda 2.
- 2) Acesso ao arquivo do disco rígido, com os valores temporais das pontes de extensômetros para o ensaio realizado, através de um programa escrito em Turbo Pascal.
- 3) Cálculo da carga Q e Y, da seguinte maneira:
 - determinação dos valores absolutos (em módulo) das pontes verticais;
 - regressão linear para determinação das relações entre os sinais das pontes verticais e laterais e as cargas vertical e lateral, baseada nos dados de calibração para as rodas 1 e 2 (item 3.3.4):

$$Y = a X + b \quad (3.1)$$

onde, a e b são os coeficientes levantados na calibração; X é o sinal da ponte e Y o sinal corrigido.

$$L11 = 2.098567 \times \text{abs}(EL11) - 0.03722$$

$$L12 = 1.995622 \times \text{abs}(EL12) + 0.43063$$

$$V11 = -13.829 \times \text{abs}(EV11) + 1.21$$

$$\begin{aligned}
 V12 &= -14.21 \times \text{abs}(EV12) + 1.462 \\
 V13 &= -14.55 \times \text{abs}(EV13) + 1.438 \\
 L22 &= 2.2027222 \times \text{abs}(EL22) + 0.51461 \\
 L21 &= 2.2203138 \times \text{abs}(EL21) + 0.023927 \\
 V21 &= -12.39 \times \text{abs}(EV21) + 0.8494 \\
 V22 &= -12.26 \times \text{abs}(EV22) + 0.1542 \\
 V23 &= -12.22 \times \text{abs}(EV23) + 0.4616;
 \end{aligned}$$

- combinação dos sinais resultantes das três pontes verticais, que variam em função do ângulo de rotação da roda, para obter um sinal contínuo em função do tempo. Isso é feito através da somatória das pontes verticais corrigidas.

$$V1 = \text{abs}(V11) + \text{abs}(V12) + \text{abs}(V13) \quad (3.2)$$

$$V2 = \text{abs}(V21) + \text{abs}(V22) + \text{abs}(V23); \quad (3.3)$$

- combinação dos sinais resultantes das duas pontes laterais, que variam em função da frequência do ângulo de rotação da roda, para um sinal contínuo em função do tempo. Isso é feito através da determinação da raiz quadrada da somatória dos quadrados das pontes laterais:

$$L1 = \sqrt{(L11^2 + L21^2)} \quad (3.4)$$

$$L2 = \sqrt{(L12^2 + L22^2)} \quad (3.5)$$

4) Cálculo da relação Y/Q

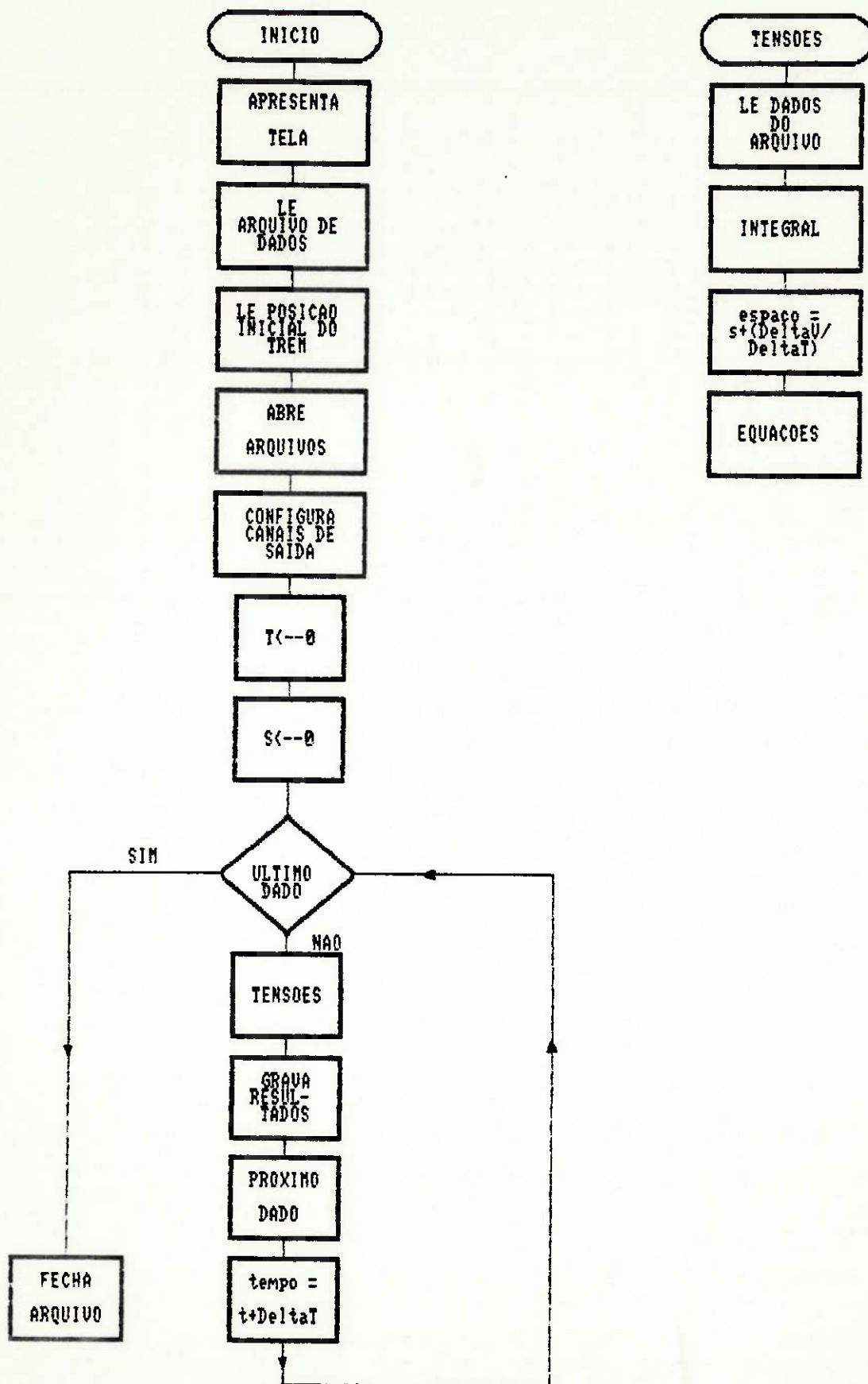
As nomenclaturas L (esforço lateral) e V (esforço vertical)

equivalem a Y e Q, respectivamente, pela União Internacional de Estradas de Ferro.

- 5) Integração da velocidade (no tempo) para determinação do espaço percorrido.

RODEIRO INSTRUMENTADO

FLUXOGRAMA



- 6) Geração de um arquivo, para guardar os valores de Q, Y, Y/Q, velocidade, espaço percorrido pelo veículo e a base de tempo.

3.3.3 Calibração (teste de laboratório)

A calibração (Figura 3.4; Foto 14) foi realizada utilizando atuadores eletro-hidráulicos do sistema MTS (Material Test System). Este sistema tem a capacidade de aplicar cargas cíclicas e possui realimentação por malha fechada, os atuadores são controlados por servo-válvulas com pressão constante no encanamento geral. As cargas foram aplicadas em diversos ângulos e condições variadas. Os sinais correspondentes as forças aplicadas foram aquisitados através de um microcomputador com interface A/D (analógico/digital) de 10 bits e capacidade para dezesseis canais (o mesmo usado no ensaio), e tratados posteriormente.

A estrutura utilizada na calibração era composta de um quadro de reação, três atuadores eletro-hidráulicos (dois para aplicar cargas verticais nos mancais de rolamento e um para aplicar cargas laterais perpendiculares) e dois trilhos para apoio do rodeiro.

As cargas foram aplicadas em sete ângulos de rotação da roda diferentes (0, 60, 90, 120, 180, 270 e 300 graus), da seguinte maneira:

- A carga vertical foi aplicada de uma maneira contínua (em forma de rampa), de 0 a 14 t e de 14 a 0 t.
- Foram aplicadas cinco cargas laterais (0, 2, 4, 6 e 8 ton).
- Variou-se a posição de contato roda/trilho em três pontos (na linha de referência, a 10 mm da linha de referência na direção da flange e a 6 mm da referência na direção oposta a flange).

Foram combinados todos os ângulos, cargas e posições para avaliar a influência de cada um dos fatores na medição dos outros (efeito cruzado).

As cargas foram aplicadas de acordo com a Figura 3.4 para a calibração de Q, o atuador 1 aplicava as cargas desejadas e o atuador 2 agia para garantir uma reação zero na roda oposta. Para a calibração de Y, o atuador 3 aplicava cargas (paralelas ao eixo) na roda oposta em que se realizava a medida. Todo o conjunto (rodeiro e atuadores) se deslocavam lateralmente para avaliar a interferência da posição lateral, P.

Foram montados arquivos para melhor avaliação dos dados de calibração, da seguinte forma:

ABCDEFG.TEM

onde: A é a posição lateral do contato roda/trilho

B é a carga lateral

CDE ângulo de rotação da roda

F número de aplicação do conjunto de cargas (cada conjunto de carga foram aplicadas três vezes).

G número da roda

A carga vertical foi aplicada de uma maneira contínua de 0 a 140 kN, para cada conjunto de outros fatores.

Foram feitas médias das respostas das pontes, englobando todos os ângulos. Esses dados foram usados na definição dos coeficientes das equações para definição de Q e Y, e na definição do erro do sistema.

A seguir a tabela relativa a calibração das pontes:

Tabela 7

Máxima não linearidade das pontes de extensômetros

PONTE E ORIENTAÇÃO (grau)	RODEIRO DO IITRI (% DO FUNDO DE ESCALA)	RODEIRO DESENVOLVIDO (% DO FUNDO DE ESCALA)
V-1 0	0.15	0.25
V-1 180	0.18	0.41
V-2 60	0.14	0.27
V-2 240	0.19	0.37
V-3 120	0.14	0.44
V-3 300	0.32	0.57
L-1 0	0.42	0.95
L-1 180	0.51	0.72
L-2 90	1.02	0.99
L-2 270	0.91	0.62

3.3.4 Ensaio de campo

Depois de corrigidas as imperfeições de projeto foi feito o ajuste dos instrumentos, definiu-se a via onde serão realizados os testes iniciais e elaborou-se o procedimento de ensaio.

O primeiro ensaio em campo para verificação do funcionamento foi realizado na via da FEPASA, na região de Rio Claro. Os sinais foram gravados em fita magnética e registrados em registrador gráfico x, t, onde foi possível observar pela primeira vez o seu funcionamento dinâmico.

Posteriormente foi realizado um outro ensaio para a FEPASA no trecho entre Araraquara e Campinas, onde os dados foram diretamente aquisitados por um microcomputador à bordo.

A seguir é apresentado um registro de ensaio típico, onde é apresentada a relação L/V (ou Y/Q pela ORE) para as duas rodas, como também a velocidade e o espaço percorrido pela composição.

 ----- DESCRICAO DO REGISTRO GRAFICO -----

Arquivo de Dados : C:\LYNX\RDCAJU51
 Data e Hora do Ensaio :

Dados do CAD:

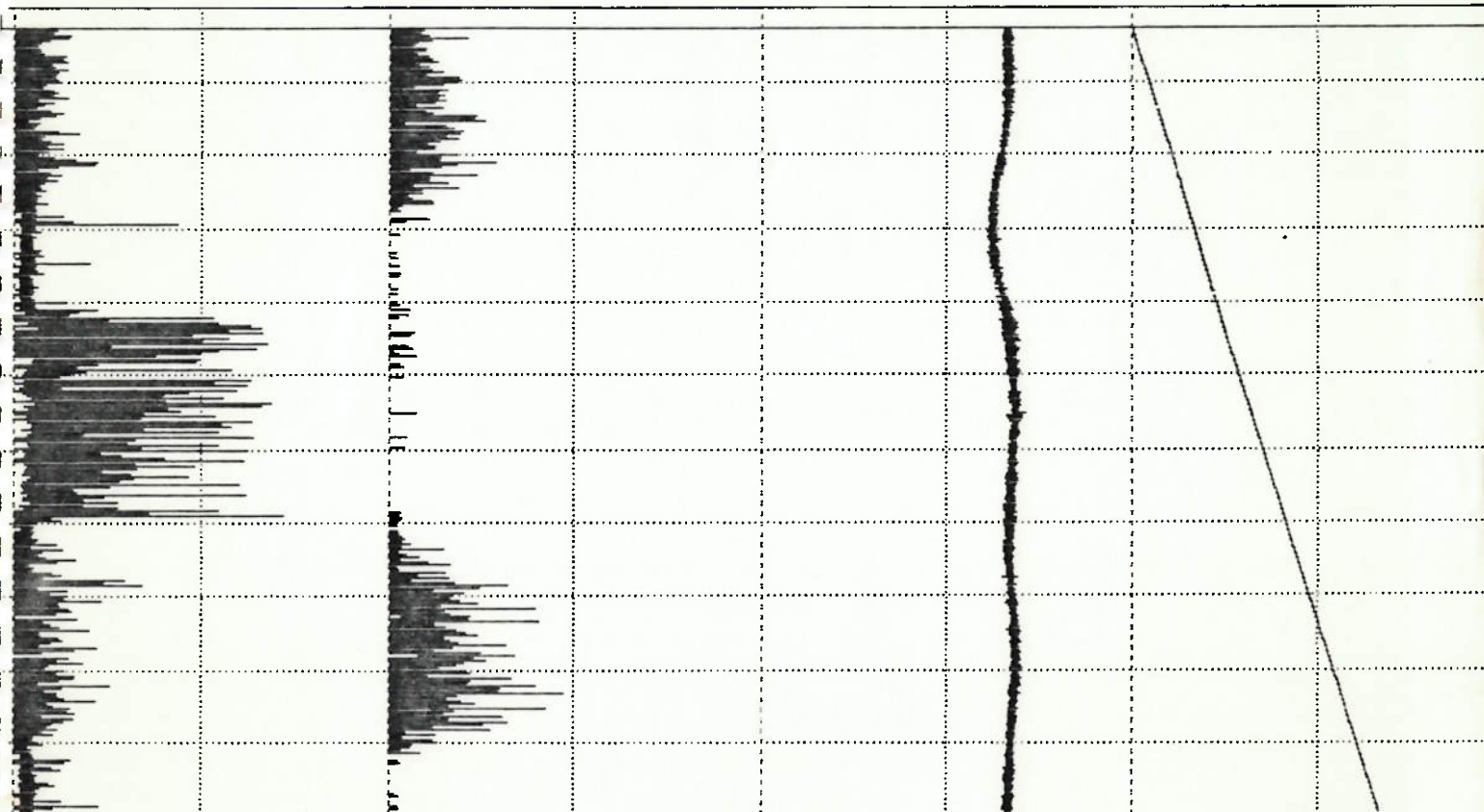
Núm. de amostras/ Canal: 21512
 Interv. entre amostras : 000'00,005.000"
 Duração : 001'47,560.000"

Intervalo do registro : 000'00,000.000" a
 001'47,555.000"

Passo de amostragem : 0001

Escala de Tempo : 10.00000 s/cm

Sinal	Canal	Nome	Unidade	Lim. Sup.	Lim. Inf.
00	00	L1/V1	adm	1.200	0.000
01	01	L2/V2	adm	1.200	0.000
02	03	VEL	km/h	100.000	0.000
03	02	ESPACO	(m)	3000.000	0.000



4. CONCLUSÕES FINAIS

À vista dos conhecimentos adquiridos no decorrer deste trabalho, destacam-se algumas conclusões:

4.1 A instrumentação da roda mostrou-se uma opção adequada para determinação da relação Y/Q.

4.2 Em virtude do primeiro protótipo ser desenvolvido para um carro de passageiros, que teoricamente tem menor instabilidade dinâmica, perdeu-se a oportunidade de uma utilização mais efetiva do equipamento, como o caso do desenvolvimento do rodeiro instrumentado para vagão tanque (carregamento de combustível). Mesmo assim, para o domínio da tecnologia foi muito importante, porque já havia dados prévios do veículo para efeito de comparação.

4.3 Devido às dificuldades no processamento e armazenamento dos dados em alta frequência (taxa de aquisição em torno de 500 Hz), é necessário um estudo detalhado das frequências que interessam para cada fenômeno estudado através do rodeiro instrumentado, alterando essa taxa de frequência para cada ensaio, evitando com isto que seja gerado um volume muito grande de dados desnecessários.

4.4 É necessário o levantamento experimental das relações Y/Q para as diversas condições de via e veículo. E com isso relacionar o valor teórico com os dados experimentais, determinando os valores ideais para as ferrovias brasileiras.

4.5 A amplificação dos sinais na própria roda mostrou-se uma decisão acertada, pois possibilitou a diminuição das interferências devido ao ruído, provocado pelo sistema de transmissão.

4.6 A não inclusão no programa de uma rotina para correção da interferência da carga vertical na ponte lateral e da carga lateral na ponte vertical, como nos modelos da EMD e AAR, não causou erro muito grande na medição dos esforços lateral e vertical (3,5 e 4,0%

do fundo de escala, respectivamente, determinada pela calibração do item 2.2.4), considerando um primeiro protótipo. Essa interferência foi minimizada pela localização dos extensômetros.

4.7 A opção por adquirir no mercado placa A/D e software para aquisição de dados, diminuiu o tempo de desenvolvimento do primeiro protótipo mas trouxe algumas limitações, como a impossibilidade do tratamento dos dados em tempo real. De qualquer maneira o interesse maior é desenvolver o projeto como um todo e não em cada componente.

O desenvolvimento de software para tratamento em tempo real está em fase final de testes.

4.8 A inexistência de procedimento confiável para a calibração dinâmica do rodeiro dificulta a sua avaliação em condições reais.

5. PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

3.5.1 Para o desenvolvimento de futuros rodeiros instrumentados sugere-se a utilização da Série de Fourier para tratar os sinais das pontes laterais, verticais e de posição de contato roda/trilho. A combinação entre os sinais de todas as pontes, possibilitará a diminuição da interferência devido ao efeito cruzado.

3.5.2 Um estudo mais detalhado dos rodeiros instrumentados existentes, assim como o seu desenvolvimento, necessita de um sistema de calibração dinâmica confiável.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PUNWANI, S.K & JOHNSON, M.R. Measurement of wheel/rail forces on the high cube, high performance covered hepper car project. ASME technical paper, 1882.
2. JOLY, R. Essais de dynamique ferroviaire. Revue Generale des Chemins de Fer. Dumond, Paris, julho/agosto, 1975.
3. NADAL, J. Locomotives à vapeur. Collection Encyclopidie Scientifique. Paris, 1908., 186 p.
4. MODRANSKY, T. et aeu. Instrumented locomotive wheels for continuons measurement of vertical and lateral loads. ASME Technical, 79-RT-8, April, 1979.
5. POCKLINGTON, A.R. & ALLEN, R.A. Improved data from load measuring wheels. I. Mech. E, July/August, 1977.
6. Instrumentation for measurement of forces on wheels of rail vehicles. AAR/DOT-FRA-ORD & D-75-11, Wasington, 1974.
7. JOHNSON, M.R. Development and use of an instrumented wheelset for the measurement of wheel/rail interaction forces. I.I.T. Research Institute, Chicago, S.d.
8. BARKEN, G.B: GIBSON, D.W; PEACOCK, R.A. Development of wheel/rail measurement system from concept to implementation. Wyle Laboratories S.S.&S.Group., Colorado, S.d.
9. JOHNSON, M.R. & JOYCE, R.P. Evaluation of wheel/rail load and position measurement concepts. Office of Research and Development Federal Railroad Administration, DOT-FR-9049, Washington, Dec., 1981.

10. ANDERSON, T.J. Calibration guidelines and equipments, important characteristics and error types for instrumented wheelsets. Swedish State Railways, Stokholm, Jan, 1981.
11. ARRADEL, M.R. Procurement of wheelset with independently rotating wheels. British Rail Research Internal Memorandum, 1988.
12. BOYD, P. Wheel instrumentation design. Ensco Inc., S.l.p., S.d.
13. GUINS, S.G. & TACK, C.E. Antology of rail vehicles dynamics: Axles, wheels and rails-wheel Interaction. American Society of Mechanical Engineering - Rail Transportation Division, N.Y., 1973. V. III.
14. HIGGINS, R. A design for next generation load measuring wheel sets. In: 1991 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, Missouri, May, 21-23, 1993.
15. OSTERMEYER, M. & BERG, H. Der heutige Entwicklungss tand der Messmethode Radsatzweelenver fahren zur Bestim Mung der Krafte Zwishen Rad und Schiene. ZEV-GEAS ANN. 102 (2), Februar., 1978.
16. PLAZA, J. Análise estatística das forças roda/trilho pelo método de contagem e matricial (Markov). In: 30 Seminário Desenvolvimento de Componentes e Sistemas Mecânicos de Veículos Ferroviários e Vias Permanentes. Campinas, 30 de junho, 1982.
17. POCKLINGTON, A.R. The B.R. load measuring wheel. Railway Technical Centre., England, S.d.

18. POCKLINGTON, A.R. Standard Procedure for Strain Ganging and wiring of load measuring wheels MKI and MKII. Railway Technical Centre-TNDA43, Derby, 1976.
19. PORTO, G.A.A. Funcionamento detalhado do método do rodeiro instrumentado da ferrovia alemã. In: 3º Seminário Desenvolvimento de Componentes e Sistemas Mecânicos de Veículos Ferroviários e Vias Permanentes. Campinas, 30 Junho, 1982.
20. SWENSON, C.A & SMITH, K.R. Development and use of instrumented locomotive wheelset. General Motors Co, Illinois, Jan., 1981.
21. ZEILHOFER, M & SUHSMUTH, G. Ermittlung der Kräfte Zwischen Rad und Shiene aus den Beergidehnungen der Radstazuiele, ZEV-OGEAS ANN., 96 (12) Dec., 1972.
22. ZOTTMANN, W. Análise das forças roda/trilho e dos movimentos do truque registrado nas viagens de medição. In: 3º Seminário Desenvolvimento de Componentes e Sistemas Mecânicos de Veículos Ferroviários e Vias Permanentes. Campinas, Junho, 30, 1982.

APÊNDICE
- DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA DO RODEIRO

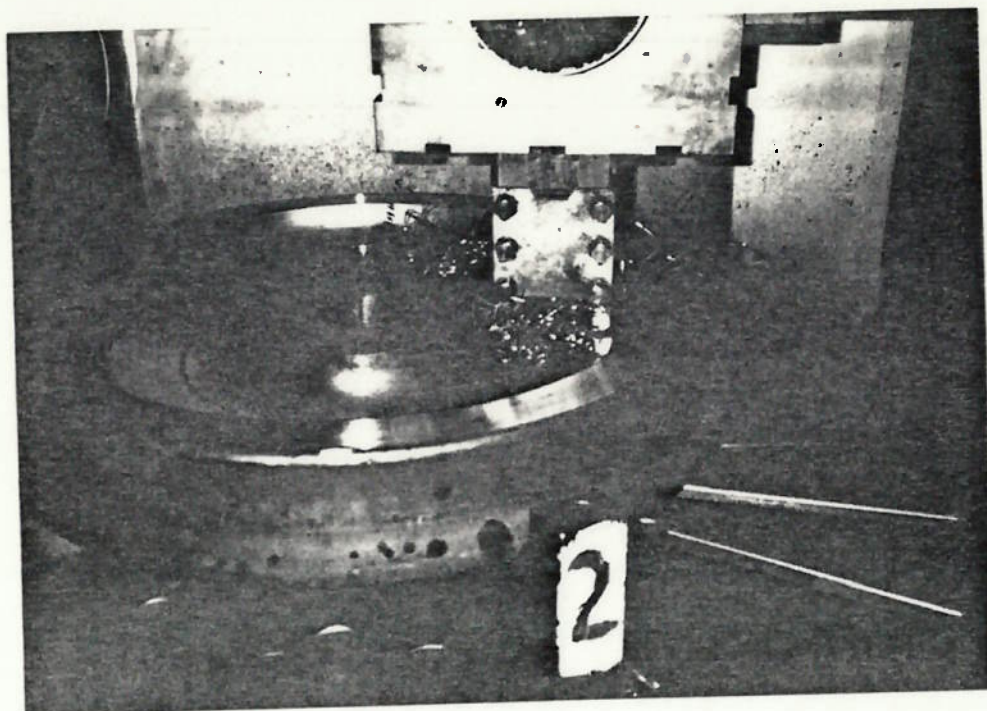


FOTO 1 - Usinagem da Roda



FOTO 2 - Preparação da Superfície para colagem do Extensômetro

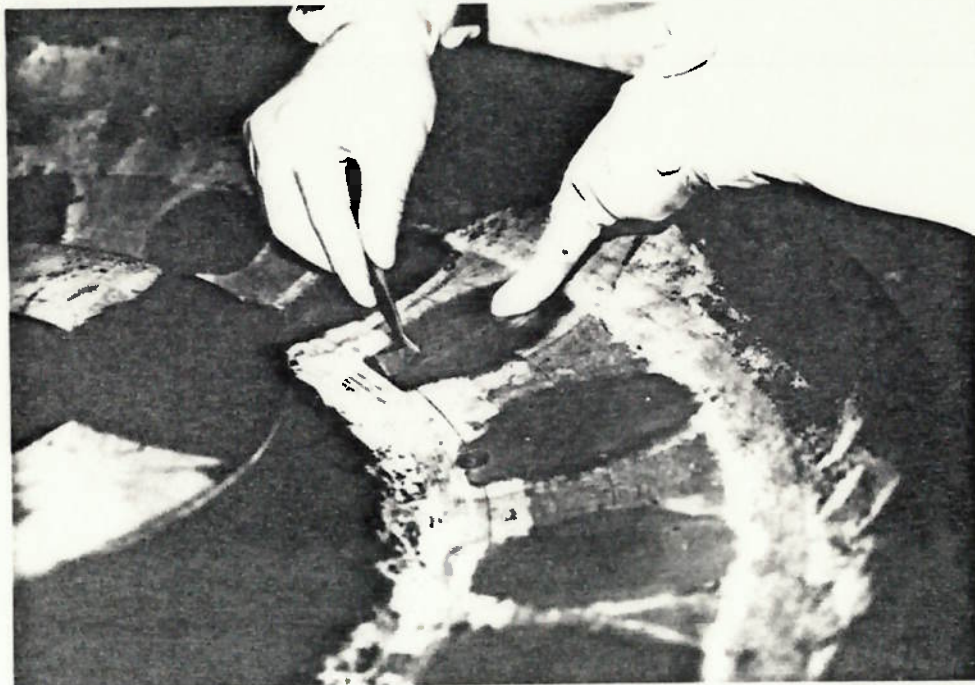


FOTO 3 - Colagem do Extensômetro

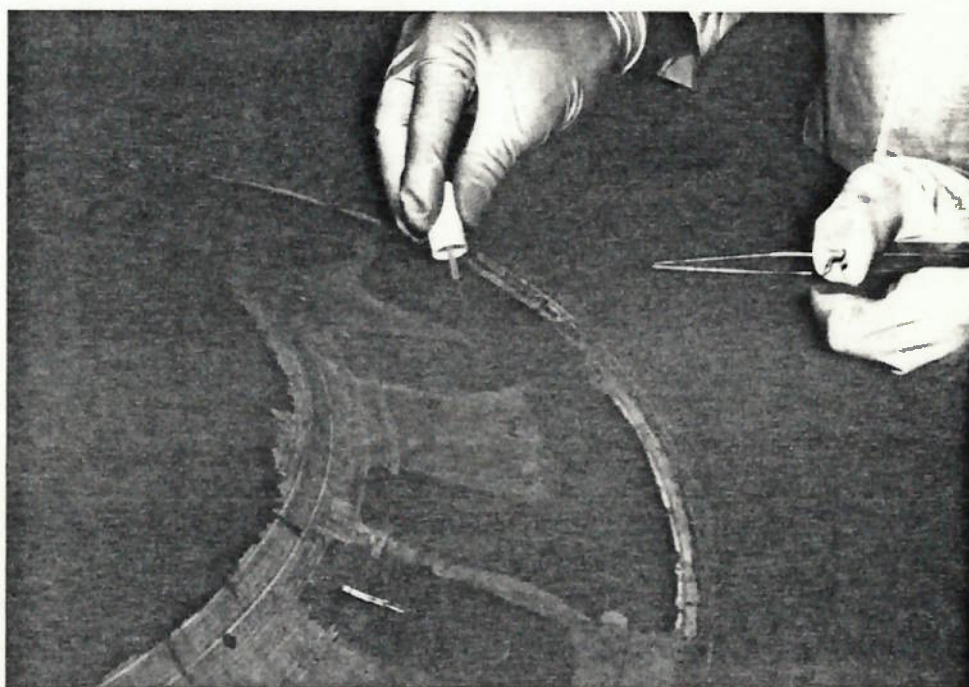


FOTO 4 - Detalhe dos Extensômetros Colados

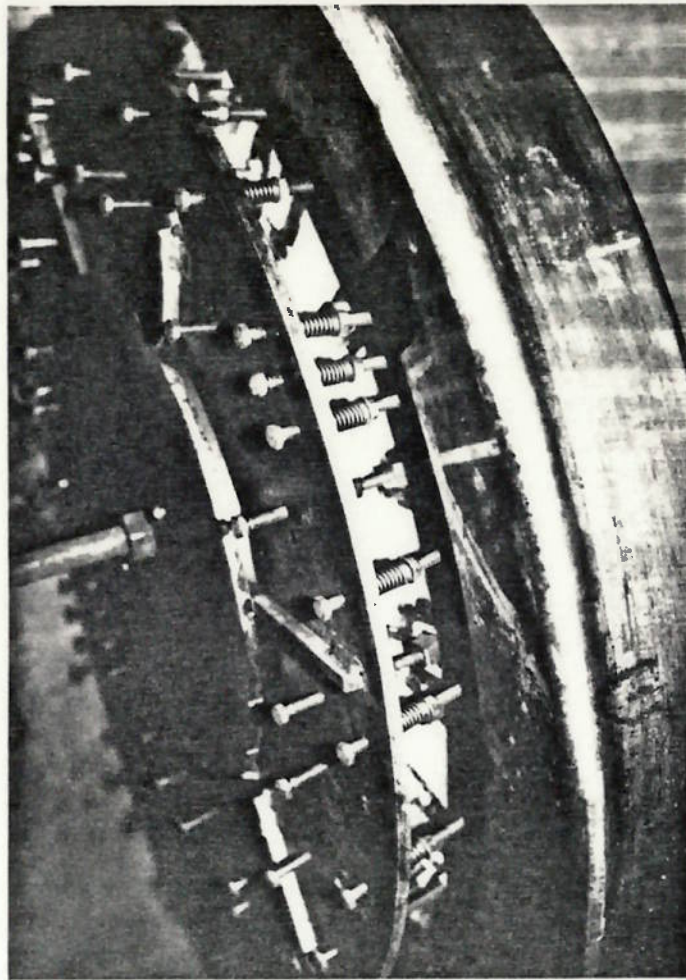


FOTO 5 - Detalhe do Dispositivo de Fixação dos Extensômetro

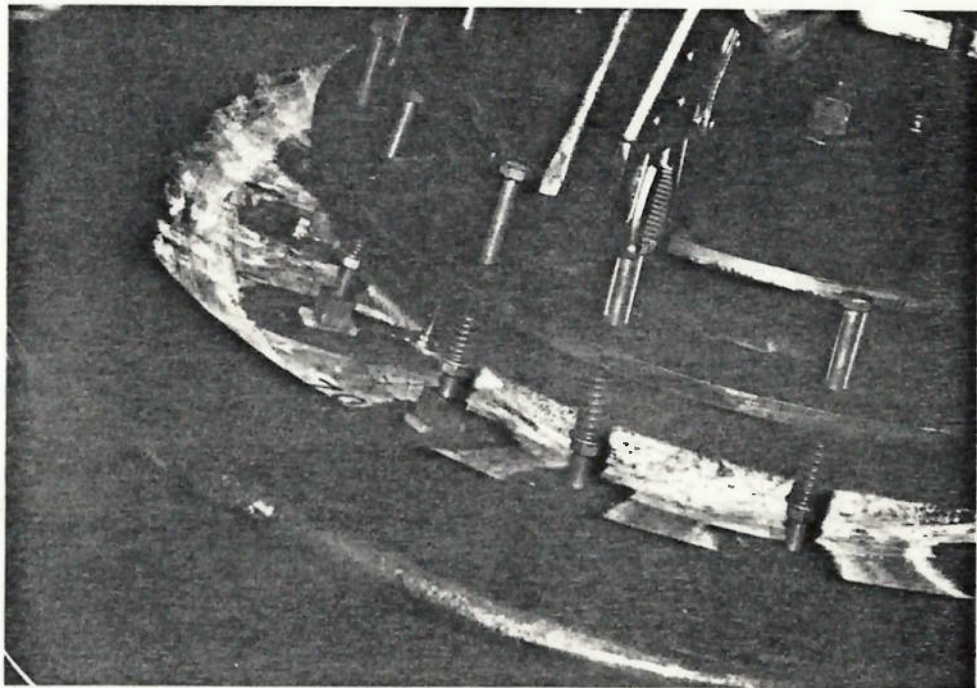


FOTO 6 - Detalhe do Posicionamento do Dispositivo de Fixação

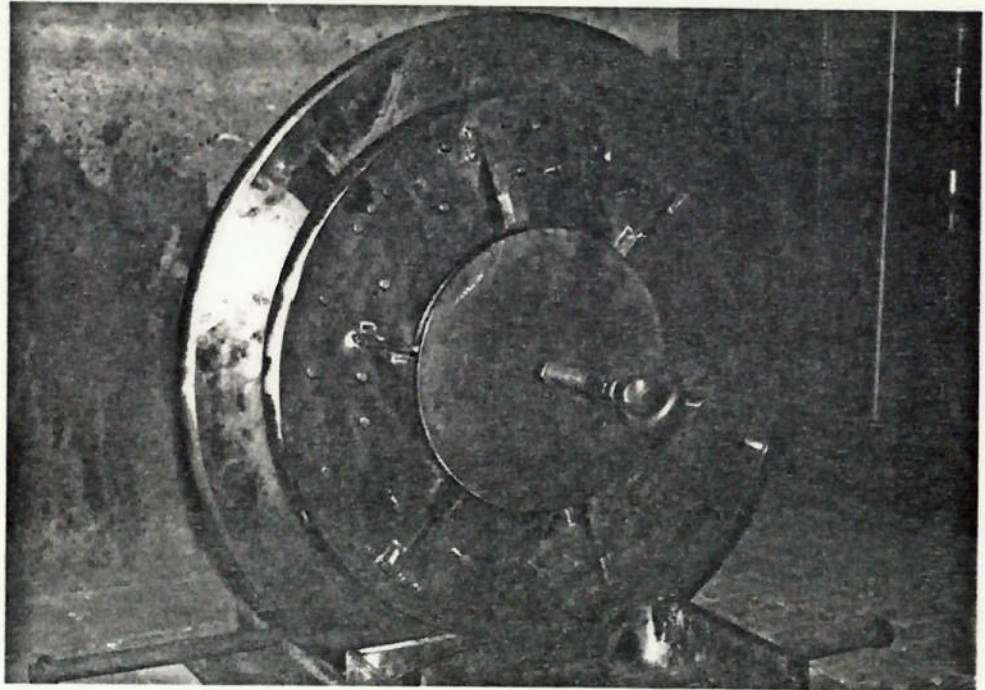


FOTO 7 - Roda dentro da Estufa para Cura da Cola

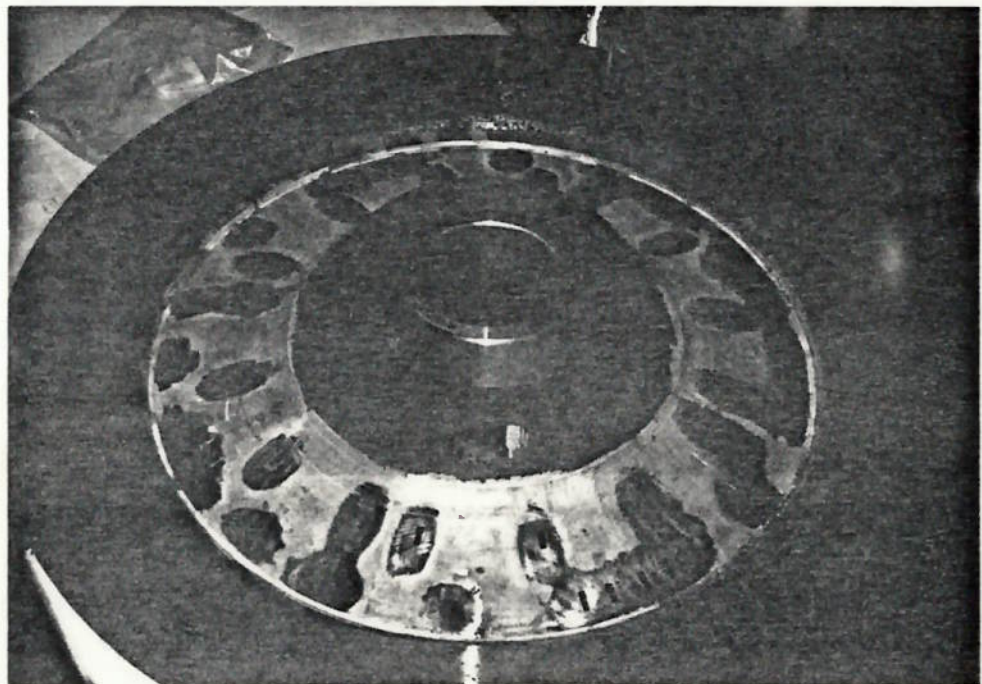


FOTO 8 - Detalhe dos Extensômetros depois da Cura da Cola

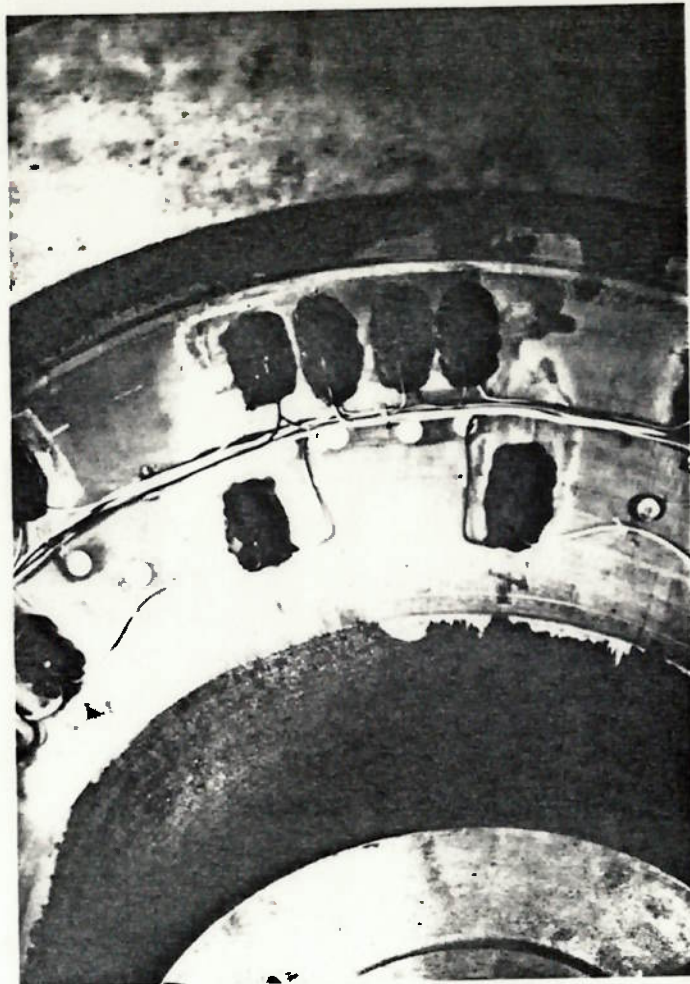


FOTO 9 - Detalhe da Proteção dos Extensômetros

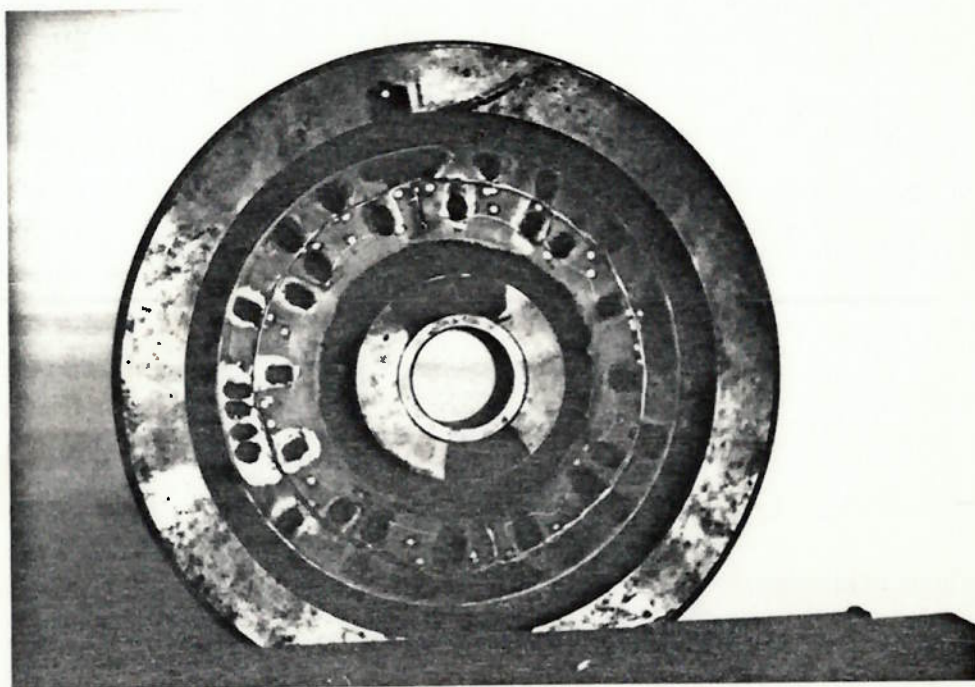


FOTO 10 - Detalhe da Fiação dos Extensômetros

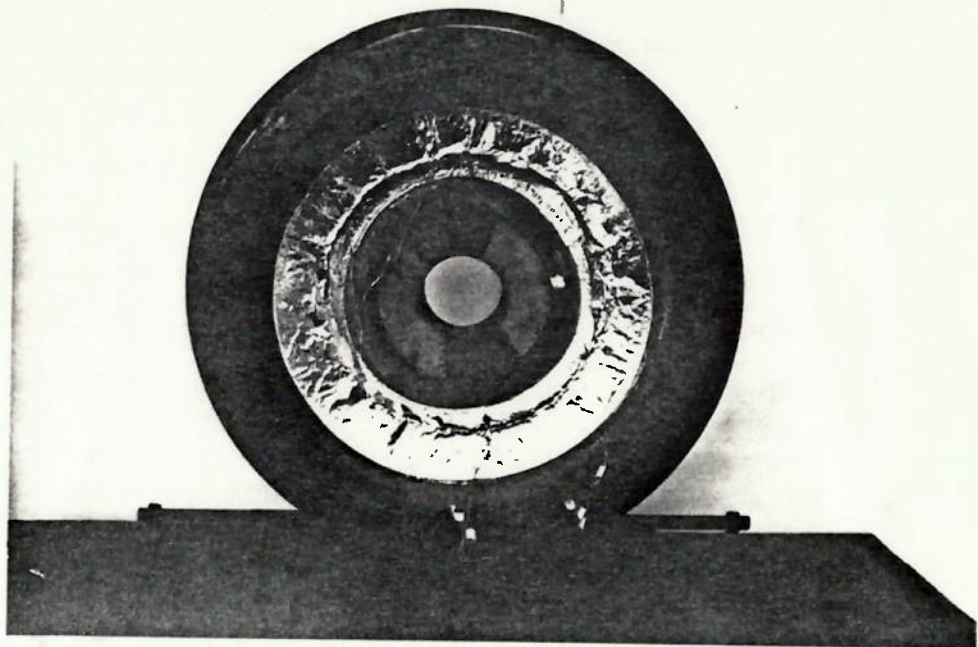


FOTO 11 - Detalhe da Proteção de Alumínio contra Interferências Eletromagnéticas

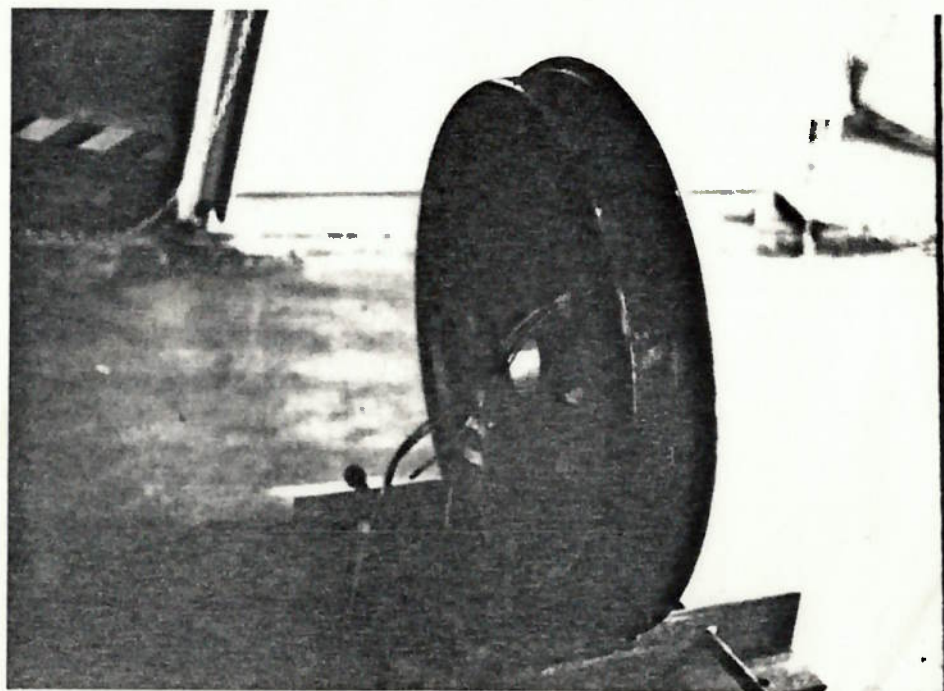


FOTO 12 - Detalhe da Calota de Alumínio para Proteção Mecânica

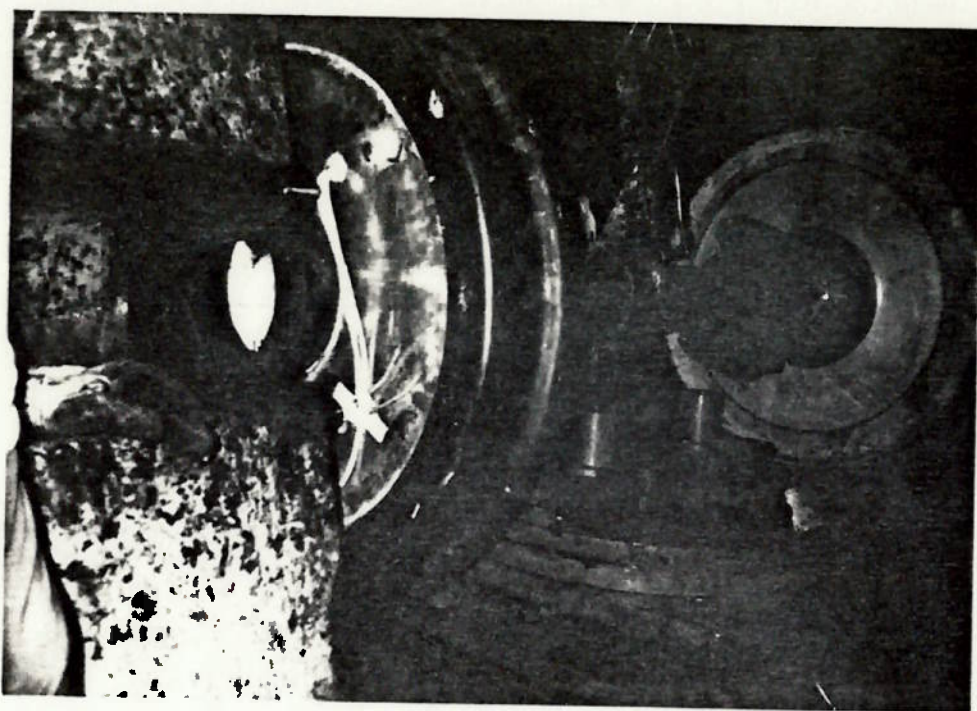


FOTO 13 - Montagem das Rodas após Instrumentação

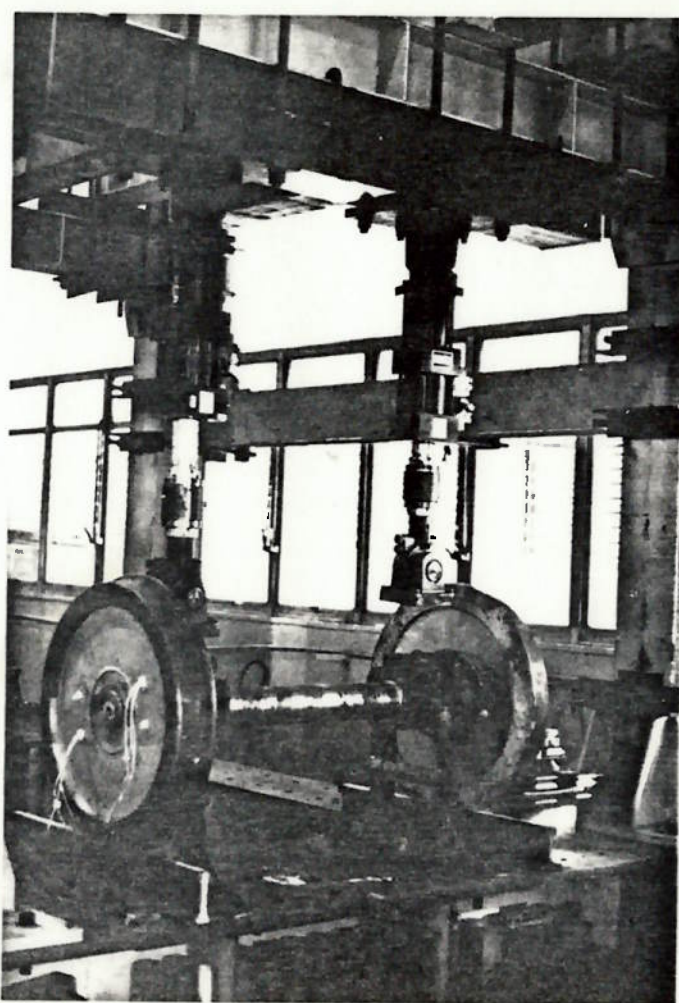


FOTO 14 - Sistema de Calibração (Atuadores e Quadro de Reação)

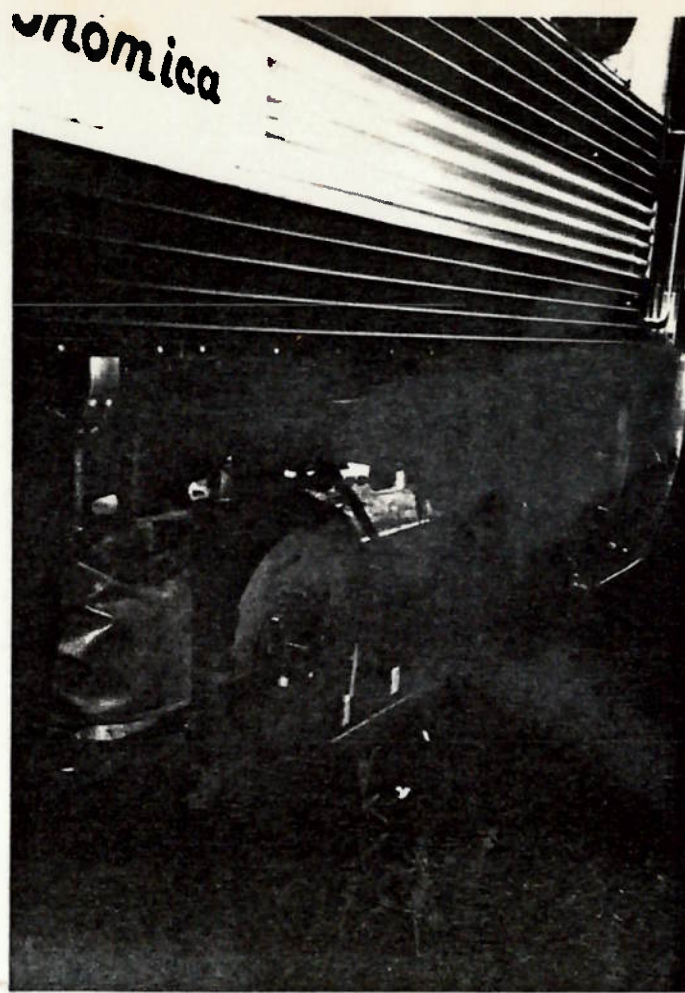


FOTO 15 - Rodeiro Instrumentado Montado no Carro de Passageiros

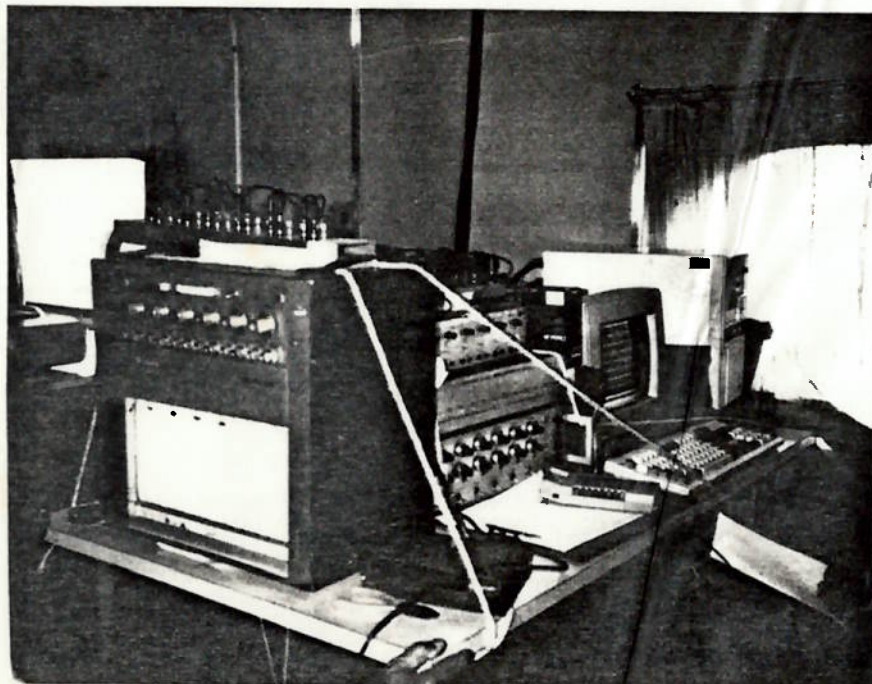


FOTO 16 - Vista da Instrumentação dentro do Carro Laboratório