

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

*Este exemplar corresponde a versão  
final da Tese defendida por Antonio  
Arlindo Guidetti Porto e aprovada  
pela Comissão Julgadora em  
14.02.86*



CONTRIBUIÇÃO AO PROCEDIMENTO  
DE AVALIAÇÃO DE TRUQUES  
FERROVIÁRIOS ATRAVÉS DO  
COMPORTAMENTO DINÂMICO NA VIA

010/86

MSc. Eng<sup>o</sup> Antonio Arlindo Guidetti Porto

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
de Campinas, como parte dos requisitos pa-  
ra obtenção do Título de Doutor em Engenha-  
ria Mecânica.

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de: Doutorado

Título da Tese: Contribuição ao Procedimento de Avaliação de Truques Ferroviários Através do Comportamento Dinâmico na Via.

Autor: MSc. Engº Antonio Arlindo Guidetti Porto

Orientador: Prof. Dr. Dino Ferraresi

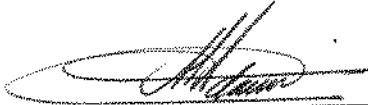
Aprovada por:



Prof. Dr. Dino Ferraresi - Presidente



Prof. Dr. Bernd Duwe



Prof. Dr. Antonio Luis Adami



Prof. Dr. Augusto Ruy de Oliveira Pinto



Prof. Dr. Fausto Rodrigues Filho

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

TESE DE DOUTORADO

CONTRIBUIÇÃO AO PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO  
DE TRUQUES FERROVIÁRIOS ATRAVÉS DO COMPORTAMENTO  
DINÂMICO NA VIA

AUTORIA

MSc. Eng<sup>o</sup> ANTONIO ARLINDO GUIDETTI PORTO

ORIENTAÇÃO

PROF. DR. DINO FERRARESI

REALIZAÇÃO

CENTRO DE TECNOLOGIA

DIVISÃO DE DESENVOLVIMENTO FERROVIÁRIO

Aos meus pais  
, Arlindo Lopes Porto  
Maria Guidetti Porto



## AGRADECIMENTOS

Ao completarmos este trabalho queremos externar os nossos agradecimentos ao nosso orientador, emérito Professor Doutor Dino Ferraresi, o qual nos incentivou e deu todo seu apoio, acompanhando a sua execução desde o início até as conclusões finais.

Aos funcionários do Centro de Tecnologia, que participaram nas medições, análise e preparação de dispositivos, externamos nosso profundo sentimento de gratidão.

Colaboraram, com este trabalho, de maneira inestimável os engenheiros Newton Rodrigues do Carmo, Silvio Franco e Augusto Cesar Carreiro de Oliveira, assim como o técnico Paulo Soares de Moura, a secretária Nadja Zutin e os desenhistas Edson José de Oliveira e Eurípides de Lima Tavares.

As entidades, Rede Ferroviária Federal, Companhia Vale do Rio Doce, Deutsche Eisenbahn Consulting (DEC), Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammen Arbeit (GTZ), pelo apoio técnico e financeiro.

Campinas, Dezembro de 1985.

R E S U M O

O presente trabalho trata de um procedimento de qualificação de protótipos de truques ferroviários, quanto ao comportamento dinâmico na via férrea. Para tanto foram programadas e efetuadas várias viagens de medição com cada tipo de truque, onde foram gravadas em fita magnética grandezas características, principalmente as forças entre roda e trilho. Após a realização destas medições, os sinais foram analisados no ponto de vista do comportamento lateral e vertical do truque na via, segurança quanto ao descarrilhamento e segurança quanto ao deslocamento transversal da super-estrutura. Foi estabelecido um critério estatístico de classificação dos truques, através dos parâmetros citados. São apresentadas também algumas sugestões para melhoria dos truques.

S U M M A R Y

This work reports a procedure for quality evaluation of railway prototype bogies, based on their dynamic behaviour in the railway. In order to reach that, several tests in the field were undertaken and the characteristic values were recorded in a magnetic tape, mainly the wheel-rail forces. After these measurements, the signals of the bogies in the track were analysed based on lateral and vertical behaviour, safety against derailment and transversal displacement of the permanent way. A statistical criterion was established for bogies classification, through the parameters described.

Some bogies improvements are also suggested.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Diese Dissertation zeigt eine Methode fuer die Beurteilung von Eisenbahndrehgestellprototypen unter Beruecksichtigung des dynamischen Verhaltens beim Befahren eines Gleises.

Viele Messfahrten wurden mit je einem Prototyp gemacht. Saemtliche Kenngroessen des Prozesses sind auf Magnetbaendern aufgezeichnet worden mit Schwerpunkt - Messung der Kraefte zwischen Rad und Schiene -. Das horizontale und vertikale Verhalten des Drehgestelles im Gleis wurde durch die aufgezeichneten Messwerte analysiert. Die Basis der Analyse waren die bekannten Grenzwerte der Entgleisungssicherheit und der Gleisrostverschiebung. Ein statistischen Beurteilungskriterium fuer Drehgestelle ist nach den gemessenen Parametern entworfen worden. Es wurden einige Verbesserungsvorschlaege fuer Drehgestellkonstruktionen aufgezeigt.

I N D I C E

|   |      |
|---|------|
| AGRADECIMENTOS.....   | IV   |
| RESUMO.....   | V    |
| SUMMARY.....  | VI   |
| ZUSAMMENFASSUNG.....  | VII  |
| ÍNDICE.....   | VIII |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....  | 1    |
| CAPÍTULO 2 - ESCOLHA DO TRECHO PARA VIAGENS DE MEDIÇÃO..                          | 3    |
| 2.1 - Considerações sobre a Ferrovia Carajás.....                                 | 3    |
| 2.2 - Características principais da via permanente....                            | 6    |
| 2.3 - Trechos de testes.....  | 7    |
| CAPÍTULO 3 - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O DESENVOLVIMEN-<br>TO DOS TRABALHOS..... | 11   |
| 3.1 - Características dos truques projetados para EFC.                            | 11   |
| 3.1.1 - Características gerais sobre os tipos de<br>truques COBRASMA e FNV.....   | 11   |
| 3.1.1.1 - Características específicas do truque<br>COBRASMA.....                  | 11   |
| 3.1.1.2 - Características específicas do truque<br>FNV.....                       | 15   |
| 3.1.2 - Características gerais do truque LHB.....                                 | 20   |
| 3.2 - Construção do carro de medição (CM) e carro au-<br>xiliar (CA).....         | 21   |
| 3.3 - Instrumentação dos truques no Centro de Tecnolo-<br>gia.....                | 25   |
| 3.3.1 - Grandezas medidas com o truque COBRASMA.....                              | 26   |
| 3.3.2 - Grandezas medidas com o truque FNV.....                                   | 30   |
| 3.3.3 - Grandezas medidas com o truque LHB.....                                   | 33   |
| 3.4 - Procedimento de medição com o Rodeiro Instrumenta<br>do.....                | 37   |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4.1 - Princípio de medição.....   | 37  |
| 3.4.2 - Circuito elétrico para medida das deforma-<br>ções.....             | 49  |
| 3.4.3 - Considerações sobre calibração do rodeiro<br>instrumentado.....     | 54  |
| 3.4.3.1 - Calibração estática.....  | 54  |
| 3.4.3.2 - Calibração dinâmica.....  | 58  |
| CAPÍTULO 4 - VIAGENS DE MEDIÇÃO.....  | 59  |
| CAPÍTULO 5 - PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DOS TRUQUES.....                     | 66  |
| 5.1 - Considerações gerais.....   | 66  |
| 5.2 - Comportamento lateral.....  | 69  |
| 5.2.1 - Movimento de auto-excitação de um rodeiro... ..                     | 69  |
| 5.2.2 - Considerações sobre o perfil cônico da roda. . .                    | 72  |
| 5.3 - Comportamento vertical.....   | 75  |
| 5.4 - Segurança ao descarrilhamento.....                                    | 75  |
| 5.4.1 - Considerações gerais.....   | 75  |
| 5.4.2 - Determinação das forças atuantes no rodeiro. . .                    | 76  |
| 5.4.3 - Considerações sobre o descarrilhamento.....                         | 80  |
| 5.5 - Solicitação transversal da via - Critério Prud'<br>Homme.....         | 82  |
| 5.6 - Análise estatística comparativa.....                                  | 84  |
| 5.6.1 - Método de classificação.....  | 84  |
| 5.6.2 - Método estatístico de classificação de<br>Kendall.....              | 87  |
| 5.6.3 - Processamento dos registros e análise compu-<br>tacional.....       | 90  |
| CAPÍTULO 6 - AVALIAÇÃO DOS TRUQUES.....                                     | 92  |
| 6.1 - Considerações gerais.....   | 92  |
| 6.2 - Análise do comportamento lateral através dos re-<br>gistros.....      | 93  |
| 6.3 - Análise do comportamento lateral através de<br>observação visual..... | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.4 - Análise da segurança ao descarrilhamento - Critério do valor limite do fator $Y/Q$ .....       | 104 |
| 6.5 - Análise da segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura - Critério Prud'Homme..... | 105 |
| 6.6 - Análise estatística comparativa do comportamento lateral.....                                  | 106 |
| 6.6.1 - Comportamento dinâmico em retas.....   | 106 |
| 6.6.2 - Comportamento dinâmico nas curvas.....   | 109 |
| 6.7 - Análise estatística comparativa do comportamento vertical.....                                 | 111 |
| 6.7.1 - Comportamento dinâmico em retas.....   | 111 |
| 6.7.2 - Comportamento dinâmico em curvas.....  | 113 |
| 6.8 - Análise estatística da segurança ao descarrilhamento.....                                      | 114 |
| 6.8.1 - Trecho em reta.....  | 114 |
| 6.8.2 - Trecho em curva.....   | 116 |
| 6.9 - Análise estatística da segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura.....           | 117 |
| 6.9.1 - Trecho em reta.....  | 117 |
| 6.9.2 - Trecho em curva.....   | 118 |
| 6.10 - Análise estatística comparativa, conjunta dos quatro truques.....                             | 119 |
| CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....   | 121 |
| 7.1 - Avaliação dos truques ensaiados.....   | 121 |
| 7.1.1 - Comportamento lateral.....   | 121 |
| 7.1.2 - Comportamento vertical.....  | 123 |
| 7.1.3 - Segurança ao descarrilhamento.....   | 123 |
| 7.1.4 - Segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura.....                                | 124 |
| 7.1.5 - Resultados da avaliação.....   | 124 |
| 7.2 - Sugestões para melhoria dos truques.....   | 124 |
| 7.3 - Considerações sobre o desenvolvimento deste traba <u>u</u>                                     |     |

|   |     |
|---|-----|
| 1ho.....                                    | 126 |
| 7.4 - Sugestões para trabalhos futuros..... | 128 |
| ANEXO I.....                                | 129 |
| ANEXO II.....                               | 133 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....             | 190 |
| SIMBOLOGIA.....                             | 193 |



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O presente trabalho teve como origem a necessidade da Companhia Vale do Rio Doce testar os truques a serem utilizados na Ferrovia de Carajás. A escolha do Centro de Tecnologia da UNICAMP para executar tal tarefa, foi devido ao fato que esta instituição conta com uma equipe especializada na área ferroviária, que vem desde 1974 realizando ensaios e pesquisas para diferentes companhias ferroviárias. Esta equipe teve um fortalecimento através do Convênio Ferroviário, firmado entre o Brasil e a Alemanha Ocidental, no qual participam o Centro de Tecnologia, a Ferrovia Alemã e universidades da Alemanha, que atuam também nesta área.

Dirigindo a Divisão de Desenvolvimento Ferroviário do Centro de Tecnologia, o autor desta tese recebeu a incumbência de executar os testes de qualificação dos truques, compreendendo comportamento na via, objeto desta tese, e ensaios de resistência à fadiga.

A metodologia utilizada para qualificação dos protótipos dos truques, é oriunda de experiência adquirida em estágios de especialização na Alemanha, contatos com especialistas alemães no Brasil, através do Convênio Ferroviário, e consulta bibliográfica. Para esta qualificação foi escolhido um procedimento possível de ser realizado com os recursos disponíveis no Centro de Tecnologia e nas nossas ferrovias. Tal procedimento compreende a determinação da resposta do truque, quanto aos seguintes fatores mensuráveis: comportamento lateral e vertical, segurança quanto ao descarrilhamento e segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura. Outro fator também considerado foi a observação visual durante as viagens de medição.

Com a finalidade de se classificar os truques quanto ao seu desempenho, foi introduzido neste trabalho o método estatístico de classificação de Kendall, o qual tem a finalidade de comparar objetos quanto ao comportamento de uma grandeza mensurável em diferentes situações. Para estas situações, foram escolhidos parâ

metros obtidos através de uma distribuição estatística de frequência das grandezas envolvidas.

Na ocasião que a CVRD solicitou os testes, ainda não se encontrava terminada a Estrada de Ferro Carajás. Para tanto foram escolhidos trechos de via da Rede Ferroviária Federal, com características semelhantes a de Carajás, tais como: geometria básica da linha, capacidade de carga e condições de operação. Foi idealizada uma composição de medição constando de: uma locomotiva, dois vagões de minério, um carro de medição e um vagão de equipamento auxiliar. Cada protótipo de truque a ser testado, era instalado num dos vagões de minério. Estes truques foram instrumentados com captadores de deslocamentos e aceleração, extensômetros elétricos e um rodeiro especial - rodeiro instrumentado, o qual media as forças de contato entre roda e trilho. Todas as medições foram gravadas em fita magnética e posteriormente analisadas no Centro de Tecnologia.

Na redação desta tese, procuramos desenvolvê-la de maneira mais didática possível, a fim de transmitir aqueles que iniciam na área ferroviária, conhecimentos da tecnologia utilizada.

O Capítulo 2 aborda a escolha de trechos da linha da Rede Ferroviária Federal com características próximas a Estrada de Ferro Carajás (EFC), para se efetuar as medições.

O Capítulo 3 aborda as características dos truques, sua instrumentação, construção do carro de medição e procedimento de medição com o rodeiro instrumentado.

No Capítulo 4 encontram-se a técnica de medição, descrição dos equipamentos e condição de operação.

O Capítulo 5 trata do procedimento de avaliação dos truques.

No Capítulo 6 encontram-se os resultados da análise das medições.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais, os resultados da avaliação, assim como considerações sobre o trabalho apresentado.

## CAPÍTULO 2

### ESCOLHA DO TRECHO PARA VIAGENS DE MEDIÇÃO

#### 2.1 - Considerações sobre a Ferrovia Carajás

O projeto Ferro Carajás, tem por objetivo a exploração econômica das jazidas de ferro da Serra de Carajás, com a colocação do minério no mercado internacional, previsto a iniciar-se a partir de 1986, basicamente sob a forma de matéria-prima para sinterização.

O transporte de minério irá viabilizar a exploração das demais reservas naturais e recursos agropecuários da região, motivando com isso a instalação de indústrias de transformação, acarretando a industrialização regional, gerando novos produtos, tanto para a exportação como para a substituição das importações, acarretando com isso as crescentes necessidades do desenvolvimento industrial do país.

Para viabilizar o escoamento deste minério e dos demais produtos da região, foi construída uma estrada de ferro, que irá transportar o minério produzido das jazidas até o porto marítimo em Ponta da Madeira, em São Luis do Maranhão.

Esta ferrovia, construída em linha singela, foi dimensionada para permitir um escoamento de 35 milhões de toneladas anuais de minério de ferro, expansível até 50 e 60 milhões de toneladas anuais, sem que haja a necessidade da duplicação da via permanente.

A EFC possui uma extensão total de 890 km, iniciando no porto marítimo em Ponta da Madeira (km 0 - São Luis - MA) e terminando na estação de carregamento (km 890) da Serra de Carajás (Fig. 2.1).

- Logo depois do porto (km 0), a estrada atravessa uma

região pantanosa entre os km 18 e 38.

- Entre Perizes (km 39) e Santa Inês (km 213), o traça do cruza vales onde ocorrem enchentes relevantes durante a estação chuvosa.

- Após Santa Inês a ferrovia penetra o estreito vale do rio Pindarê, cujas partes mais baixas são inundadas anualmente. Por esta razão, a ferrovia se situará na encosta do lado direito até o km 415, onde será transposto o rio Pindarê.

- A partir deste ponto, a ferrovia sobe, atingindo sua elevação máxima a 324 m no km 471, ultrapassando neste ponto o platô da serra Gurupi.

- No km 541 a estrada cruza a rodovia Belém-Brasília, descendo até atingir o vale do rio Tocantins, cruzando-o no km 722.

- No km 737 a estrada chega a cidade de Marabá, que representa o maior núcleo urbano existente nas proximidades de Carajás.

- O traçado prossegue através da densa floresta até atingir o rio Parauapebas (km 860). Deste ponto, em diante a ferrovia sobe novamente até a estação de carregamento, na cota de 217 m.

## 2.2 - Características principais da via permanente

Cita-se abaixo os principais dados da infra-estrutura , bem como da super estrutura:

- . Extensão da via principal - 890 km;
- . Extensão em tangente - 653,73 km;
- . Extensão em curvas à esquerda - 115 km;
- . Extensão em curvas à direita - 122 km;
- . Comprimento médio das curvas - 700 m;
- . Raio médio das curvas - 1 500 m;
- . Raio mínimo das curvas - 869 m;
- . Número total de curvas - 344, com as seguintes características:

| Raio<br>(m) | Frequência | Superelevação<br>(mm) |
|-------------|------------|-----------------------|
| 859,46      | 90         | 15                    |
| 1 145,93    | 57         | 0                     |
| 1 718,88    | 171        | 0                     |
| 3 437,75    | 26         | 0                     |

- . Rampas máximas compensadas:  
com o trem carregado - 4 ‰ - sentido Carajás - São Luis  
com o trem vazio - 10 ‰ - sentido São Luis - Carajás
- . Bitola -  $1\,600 \begin{smallmatrix} +5 \\ -3 \end{smallmatrix}$  mm (Fig. 2.2);
- . Plataforma (largura útil) - 7,6 m;
- . Lastro - 300 mm;

- . Extensão das obras de artes especiais - 11,2 km;
- . Trilhos com boletos tratados termicamente (seção 136 RE/TR. 68 ABNT) - 68 kg/m;
- . Inclinação dos trilhos - 1:40;
- . Fixação elástica de duplo estágio (Pandrol) ou placa GEO com grampos Denik;
- . Comprimento dos trilhos soldados eletricamente - 432 m;
- . Dormente de madeira tratada - 0,17 x 0,24 x 2,80 m, com 1 850 dormentes por quilômetro, com espaçamento de 54 cm.

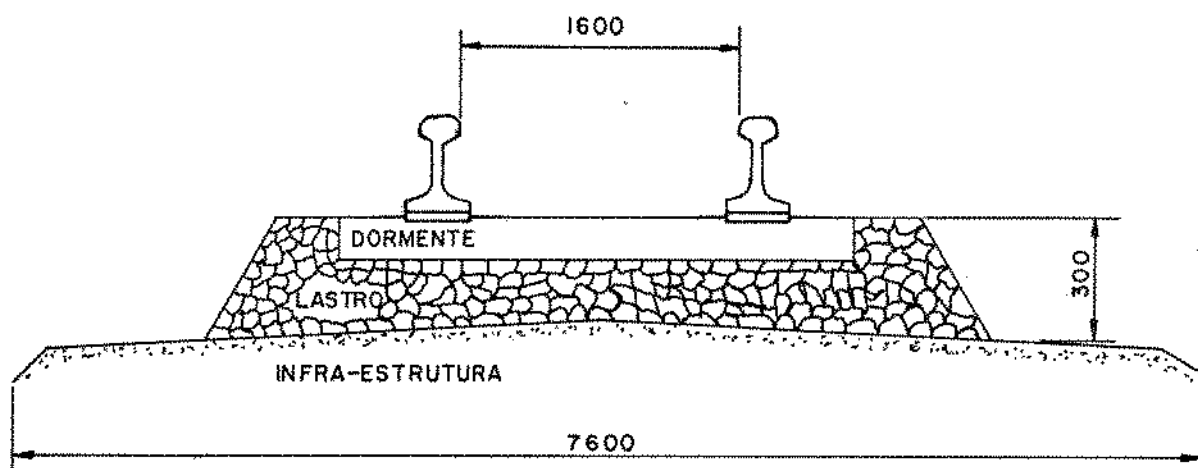


Figura 2.2 - Seção transversal da via.

### 2.3- Trechos de testes

As viagens de medição devem ser realizadas de preferência na via na qual os vagões irão trafegar. Nas épocas das medições, a Estrada de Ferro Carajás não estava ainda concluída, o que impossibilitou de se realizar testes nesta ferrovia. Para tanto, a Rede Ferroviária Federal em colaboração com a Companhia Vale do Rio Doce, colocou à disposição a utilização de sua via para o desenvolvimento dos trabalhos.

Com a finalidade de simular o melhor possível as condições de serviço, as viagens de medição devem ser realizadas em condições de operação semelhante às da EFC, bem como, as condições de via com geometria básica o mais próximo possível. Deve também, os trechos de teste apresentar erros de geometria que simulem não apenas uma condição de via nova, mas também de uma via em condições limite de tolerância.

Quanto as condições de operação, a EFC está programada para as composições viajarem a 65 km/h com os vagões carregados e a 80 km/h com os vagões vazios. A fim de se obter informações mais completas, as viagens de teste foram efetuadas com velocidades a partir de 40 km/h, com incrementos de 10 km/h, permitindo assim avaliar o comportamento dinâmico dos truques em função da velocidade da composição.

Para se escolher os trechos de teste, foi fornecida à RFFSA os seguintes requisitos básicos:

- . Trechos com bitola entre 1 597 a 1 605 mm;
- . Curvas com raios de curvatura com valores preferencialmente dentro de um desvio de  $\pm 10\%$  dos raios utilizados na EFC, a saber: 860 m, 1 146 m, 1 718 m e 3 438 m;
- . Os trechos devem ser próximos a pátios para permitir a reversão da locomotiva e eventuais paradas de emergência;
- . Próximo aos trechos deverá haver uma oficina mecânica da RFFSA, para instalação de equipamentos e eventuais reparos que forem necessários.

Após longa pesquisa, a RFFSA informou que na linha do centro haviam trechos com as condições acima citadas. Desta forma, a RFFSA forneceu o protocolo "Perfil Longitudinal da Linha", do km 109 ao 192, com o qual foi estudado detalhadamente por nós, os possíveis trechos de medição [1], [2] e [3].

Escolheu-se dois trajetos de teste, um próximo à Três

Rios e outro próximo à Barra do Piraí. Neste trajeto foram colocadas as estacas com numeração de 1 a 25 no trecho de Três Rios e de 26 a 37 no trecho de Barra do Piraí, subdividindo assim o trajeto de medição em sub-trechos com características semelhantes a EFC.

A Tabela 2.1, refere-se aos sub-trechos em reta com extensão maior que 400 m, enquanto que na Tabela 2.2 são indicados os sub-trechos em curva.

TABELA 2.1 - Sub-trechos retos maiores que 400 m, escolhidos para as medições.

| Região                          | Localização<br>(do km ao km) |         | Demarcação<br>na Via | Variação da bitola média<br>(mm)  | Extensão<br>(m) |
|---------------------------------|------------------------------|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Trecho próximo à Barra do Piraí | 109,761                      | 110,546 | 37 - 36              | 1 603 <sup>+2</sup> <sub>-4</sub> | 785             |
|                                 | 112,930                      | 113,600 | 34 - 33              | 1 602 <sup>+2</sup> <sub>-4</sub> | 670             |
|                                 | 113,754                      | 114,440 | 32 - 31              | 1 599 <sup>+2</sup> <sub>-2</sub> | 686             |
|                                 | 114,500                      | 115,280 | 30 - 29              | 1 599 <sup>+5</sup> <sub>-2</sub> | 780             |
|                                 | 115,604                      | 117,309 | 27 - 26              | 1 601 <sup>+3</sup> <sub>-1</sub> | 1 705           |
| Trecho próximo à Três Rios      | 173,382                      | 174,152 | 21 - 20              | 1 602 <sup>+2</sup> <sub>-1</sub> | 770             |
|                                 | 175,840                      | 176,443 | 14 - 13              | 1 600 <sup>+2</sup> <sub>-2</sub> | 603             |
|                                 | 176,950                      | 177,682 | 11 - 10              | 1 600 <sup>+2</sup> <sub>-2</sub> | 732             |
|                                 | 178,138                      | 178,592 | 9 - 8                | 1 599 <sup>+2</sup> <sub>-2</sub> | 454             |
|                                 | 178,760                      | 179,776 | 7 - 6                | 1 600 <sup>+2</sup> <sub>-2</sub> | 1 016           |
|                                 | 181,270                      | 182,313 | 4 - 3                | 1 600 <sup>+2</sup> <sub>-2</sub> | 1 043           |



TABELA 2.2 - Sub-trechos para as medições, baseados nas curvas da Estrada de Ferro Carajás.

| Raio de curvatura da EFC (m) | Região                          | Localização (do km ao km) | Demarcação na Via | Raio de curvatura do trecho escolhido (m) | Extensão (m) |  |
|------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------|---|--------------|--|
| 860                          | Trecho próximo à Barra do Piraí | 110,546 110,673           | 36 - 35           | 849                                       | 127          |  |
|                              |                                 | 112,810 112,929           | 33 - 32           | 929                                       | 119          |  |
|                              |                                 | 115,394 115,604           | 28 - 27           | 805                                       | 210          |  |
|                              | Trecho próximo à Três Rios      | 172,509 172,780           | 25 - 24           | 849                                       | 271          |  |
|                              |                                 | 172,801 172,926           | 24 - 23           | 849                                       | 125          |  |
|                              |                                 | 175,557 175,703           | 16 - 15           | 905                                       | 146          |  |
|                              |                                 | 175,716 175,839           | 15 - 14           | 578                                       | 123          |  |
|                              |                                 | 176,443 178,703           | 13 - 12           | 819                                       | 260          |  |
|                              |                                 | 181,157 181,270           | 5 - 4             | 828                                       | 113          |  |
|                              |                                 | 182,772 182,921           | 2 - 1             | 905                                       | 149          |  |
| 1 146                        | Trecho próximo à Três Rios      | 173,290 173,382           | 22 - 21           | 1 134                                     | 92           |  |
|                              |                                 | 174,152 174,249           | 20 - 19           | 1 206                                     | 97           |  |
| 1 718                        |                                 | 175,433 175,552           | 17 - 16           | 1 677                                     | 119          |  |
| 3 438                        |                                 | NÃO EXISTE NO TRECHO      |                   |   |              |  |

## CAPÍTULO 3

### CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS

#### 3.1 - Características dos truques projetados para EFC

Três tipos de truques foram projetados para serem utilizados em Carajás:

- Truque COBRASMA - Fabricado pela COBRASMA S/A.
- Truque FNV - Fabricado pela Fábrica Nacional de Vagões
- Truque LHB - Fabricado pela Link Hofmann Busch

##### 3.1.1 - Características gerais sobre os tipos de truques COBRASMA e FNV

A estrutura destes truques constitui-se basicamente de três partes, sendo duas laterais e uma travessa central, apoiada sobre aquelas através de pacotes de molas helicoidais. O vagão é sustentado sobre a travessa central, através do *apoio central plano*. As laterais são apoiadas diretamente nas caixas de rolamentos dos rodeiros. Entre as partes da estrutura do truque, bem como entre as laterais e as caixas de rolamentos, existem folgas que permitem pequenos movimentos relativos, limitados por guias e batentes.

O sistema de amortecimento entre a lateral e a travessa é do tipo *atrito seco*, através de cunhas.

Este tipo de suspensão é denominada *suspensão secundária*.

##### 3.1.1.1 - Características específicas do truque COBRASMA

Foi determinada experimentalmente a constante de mola do *pacotes de molas*, chegando-se ao valor  $k = 4\ 238\ \text{N/mm}$ . A configuração das molas encontra-se na figura 3.1.

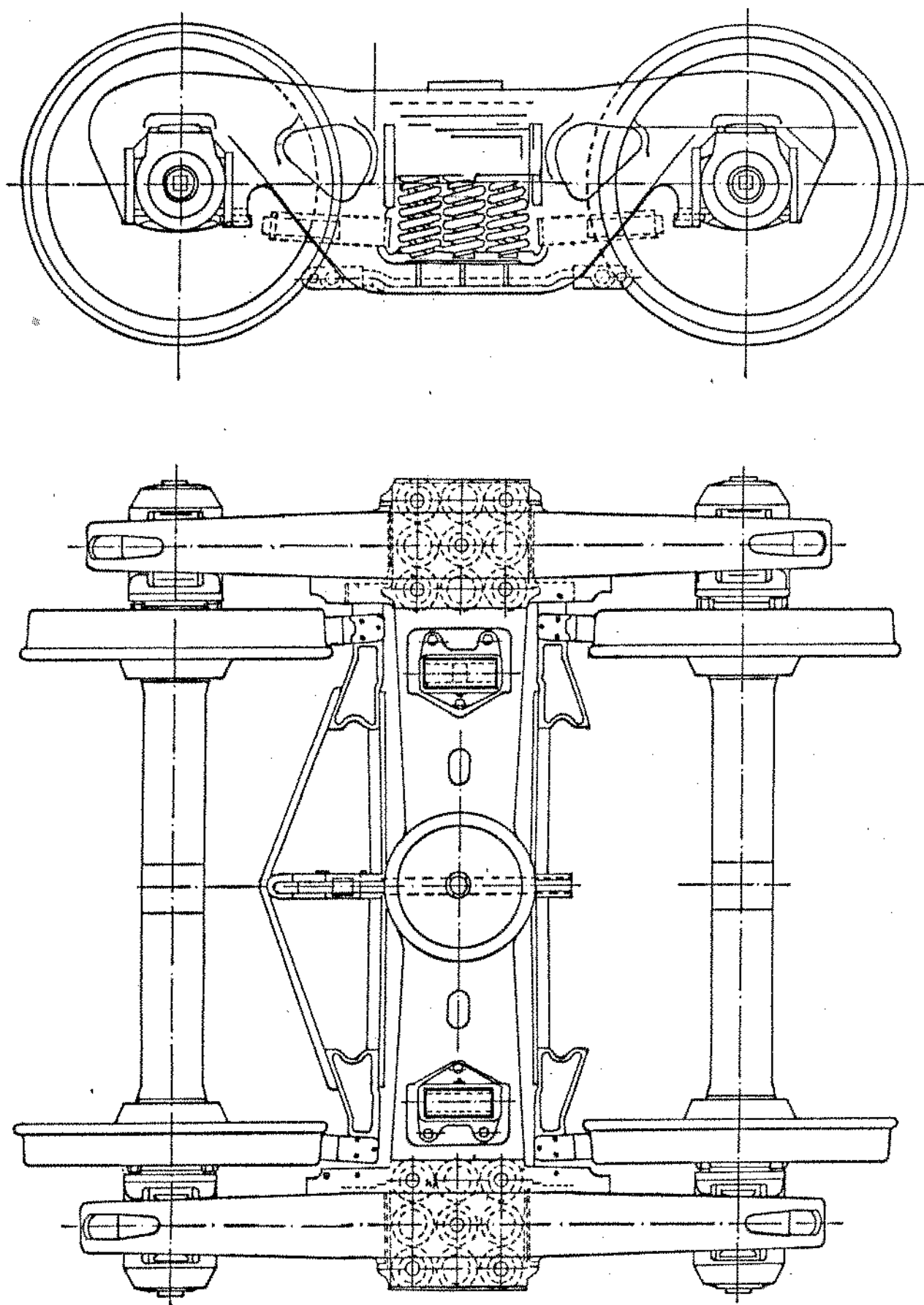


Figura 3.1 - Esquema do truque COBRASMA com a configuração das molas.

A frequência natural vertical mais baixa do vagão é determinada aproximadamente:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k}{m_0}} \quad (3.1)$$

$m_0$  = massa oscilante

$m_0$  = 11 700 kg (vagão vazio)

$m_0$  = 120 000 kg (vagão carregado)

Substituindo-se tem-se:

$$f_0 = 6,06 \text{ Hz}$$

$$f'_0 = 1,91 \text{ Hz}$$

O sistema de amortecimento é efetuado através de cunhas de atrito pré-comprimidas e independente da suspensão principal. Isto significa que a força de atrito entre a travessa e a lateral é constante, não dependendo se o vagão está vazio ou carregado (Fig. 3.2).

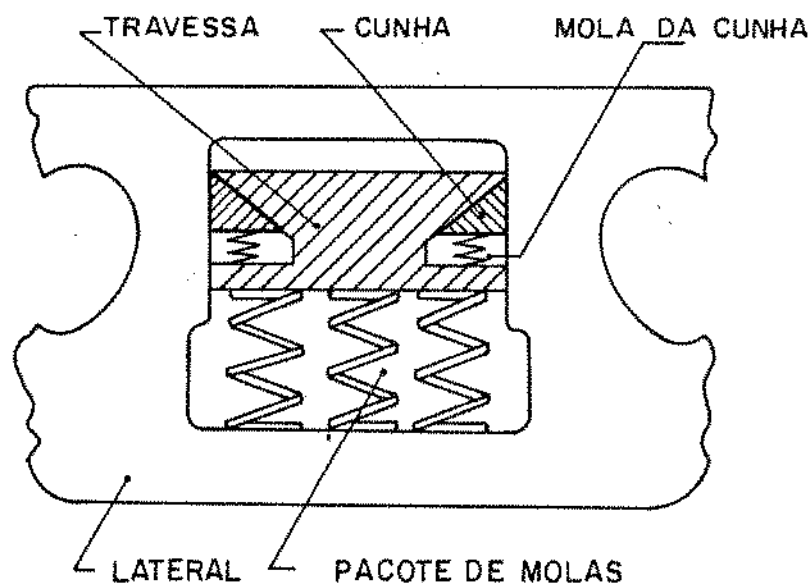


Figura 3.2 - Esquema do sistema de amortecimento do truque COBRASMA.

A superfície de contato da cunha de atrito encontra-se na figura 3.3.

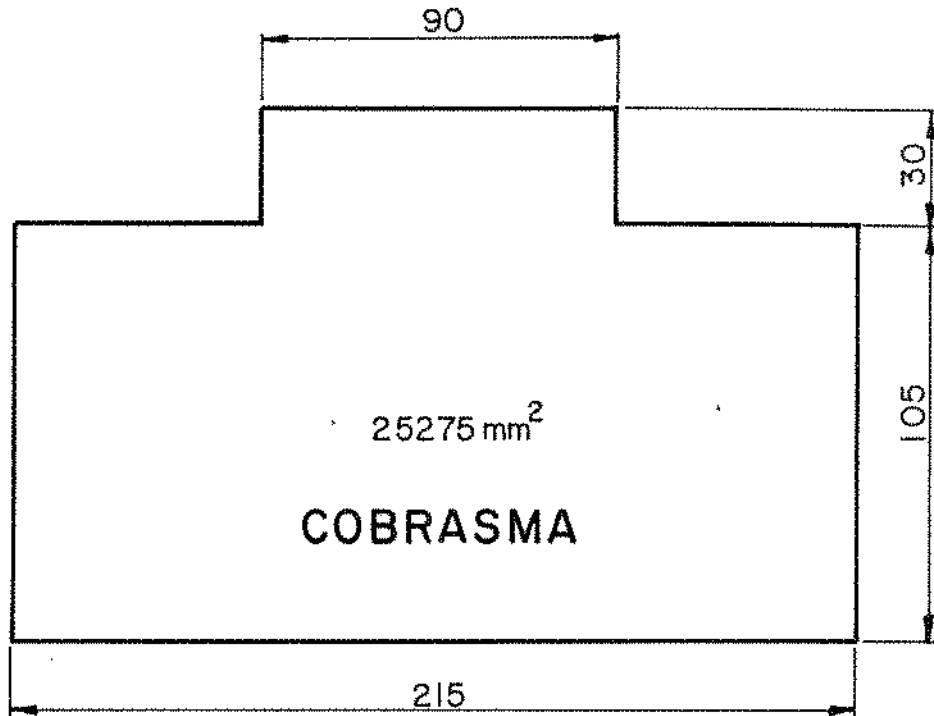


Figura 3.3 - Superfície de contato da cunha de atrito do truque COBRASMA.

O truque COBRASMA apresenta duas variantes quanto ao sistema de *ampara-balanço*:

- a) Sistema *ampara-balanço* sem contato (Fig. 3.4 - a);
- b) Sistema *ampara-balanço* de apoio constante (Fig. 3.4 - b).

Neste último sistema existe sempre atrito de escorregamento entre o *ampara-balanço* e a caixa do vagão. Sua função é de amortecimento de giro do truque contra a caixa do vagão, além de reduzir o balanço da caixa.

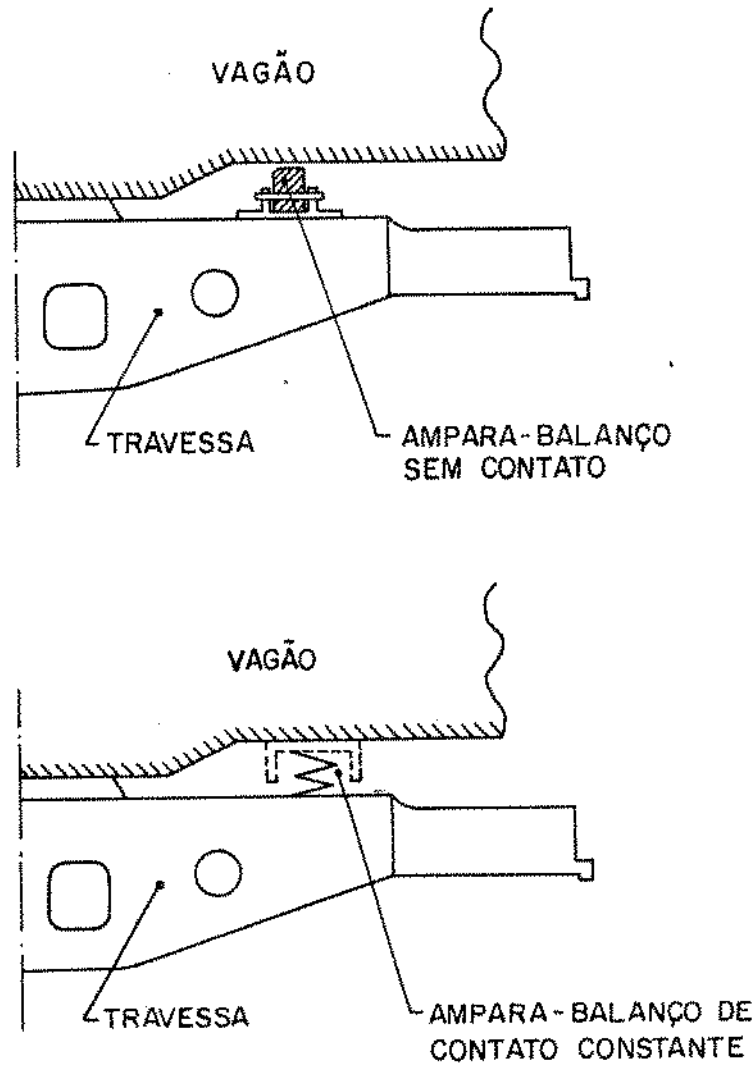


Figura 3.4 - Esquemas dos sistemas ampara-balanço.

3.1.1.2 - Características específicas do truque FNV .

A constante de mola do pacote de molas foi de  $k = 4\ 073\ \text{N/mm}$ . A configuração das molas encontram-se na figura 3.5.

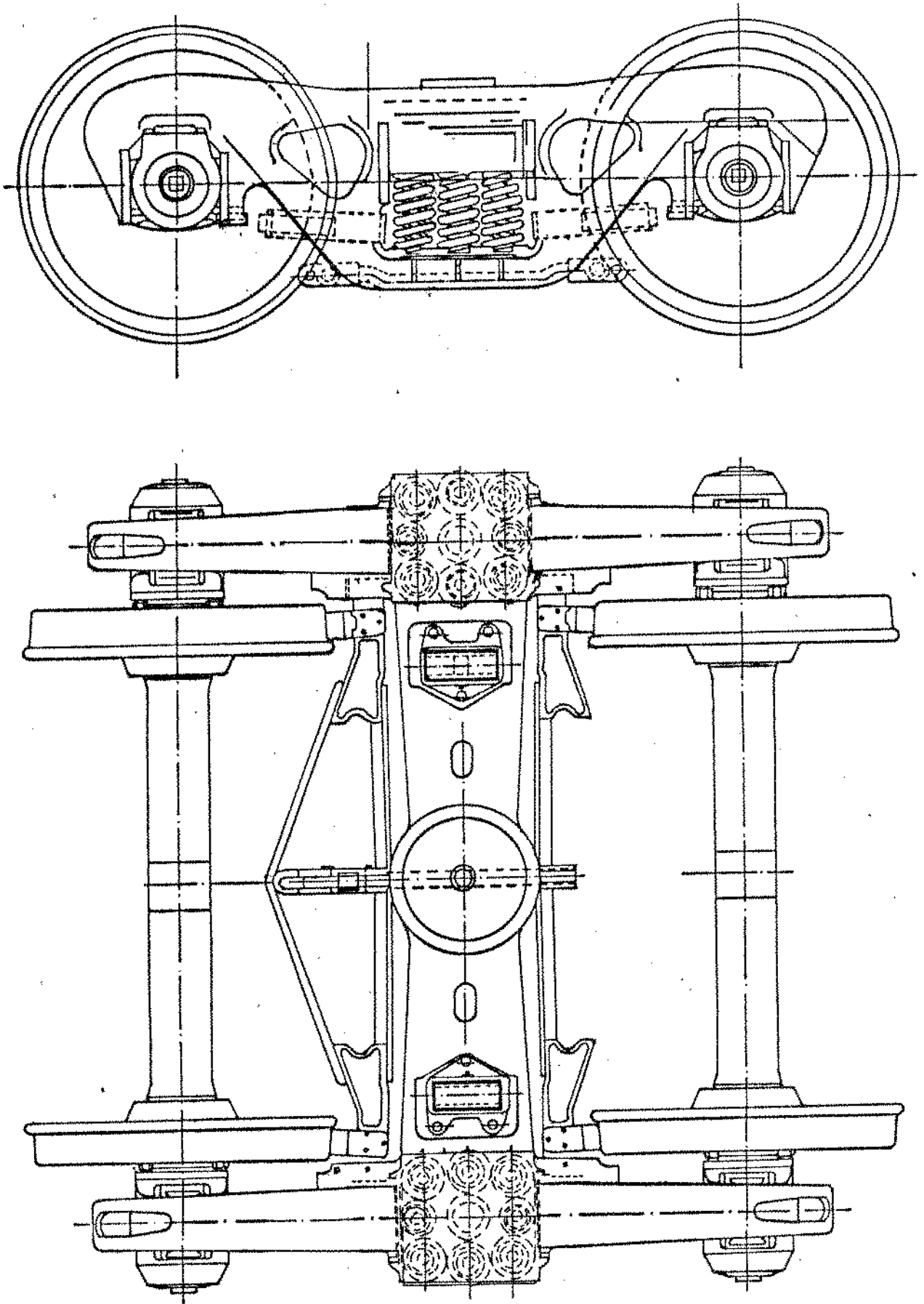


Figura 3.5 - Esquema do truque FNV com a configuração das molas.

A frequência natural vertical mais baixa do vagão, determinada com a fórmula (3.1) é:

$$f_0 = 5,95 \text{ Hz} \quad (\text{vagão vazio})$$

$$f'_0 = 1,86 \text{ Hz} \quad (\text{vagão carregado})$$

O sistema de amortecimento é efetuado através de cunha de atrito, cuja força de compressão é dependente da posição da suspensão. Isto é, as molas que comprimem fazem parte da suspensão do truque (Fig. 3.6). Por estas considerações, a força de atrito para o vagão vazio é menor que para o vagão carregado.

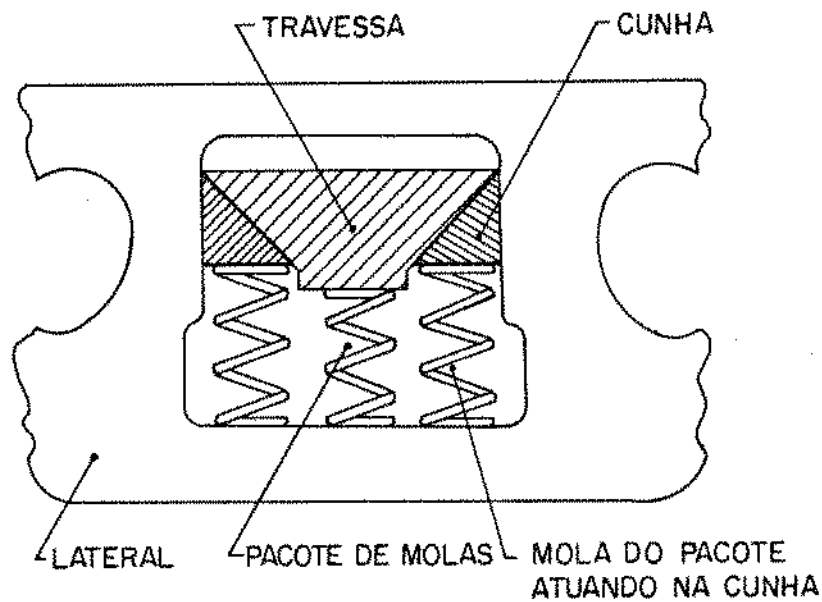


Figura 3.6 - Esquema do sistema de amortecimento do truque FNV.

A superfície de contato da cunha de atrito encontra-se na figura 3.7.



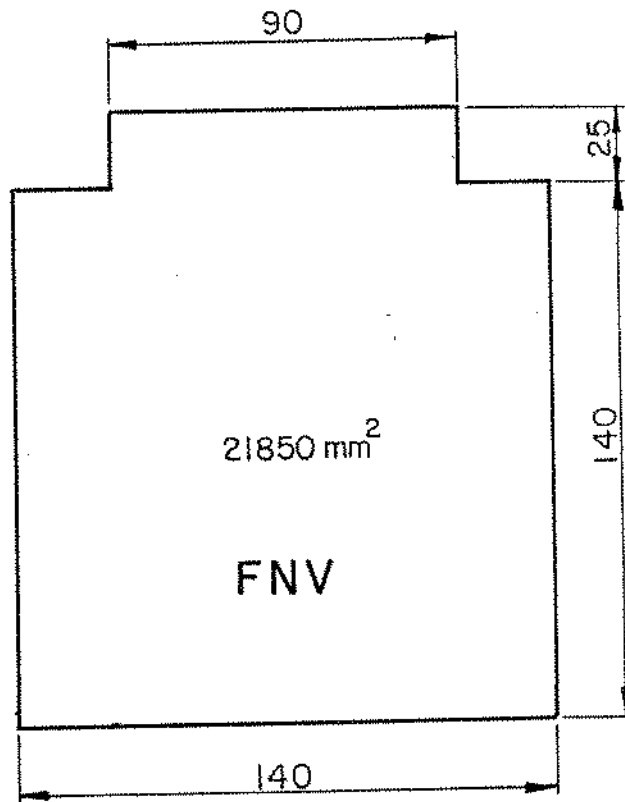


Figura 3.7 - Superfície de contato da cunha de atrito do truque FNV.

O truque FNV apresenta também duas variantes quanto ao sistema de *ampara-balanço*:

- a) Sistema de *ampara-balanço* sem contato;
- b) Sistema de *ampara-balanço* sem contato e complementarmente um outro com contato - *Center Plate extension Pad (C-PEP)* (Fig. 3.8)

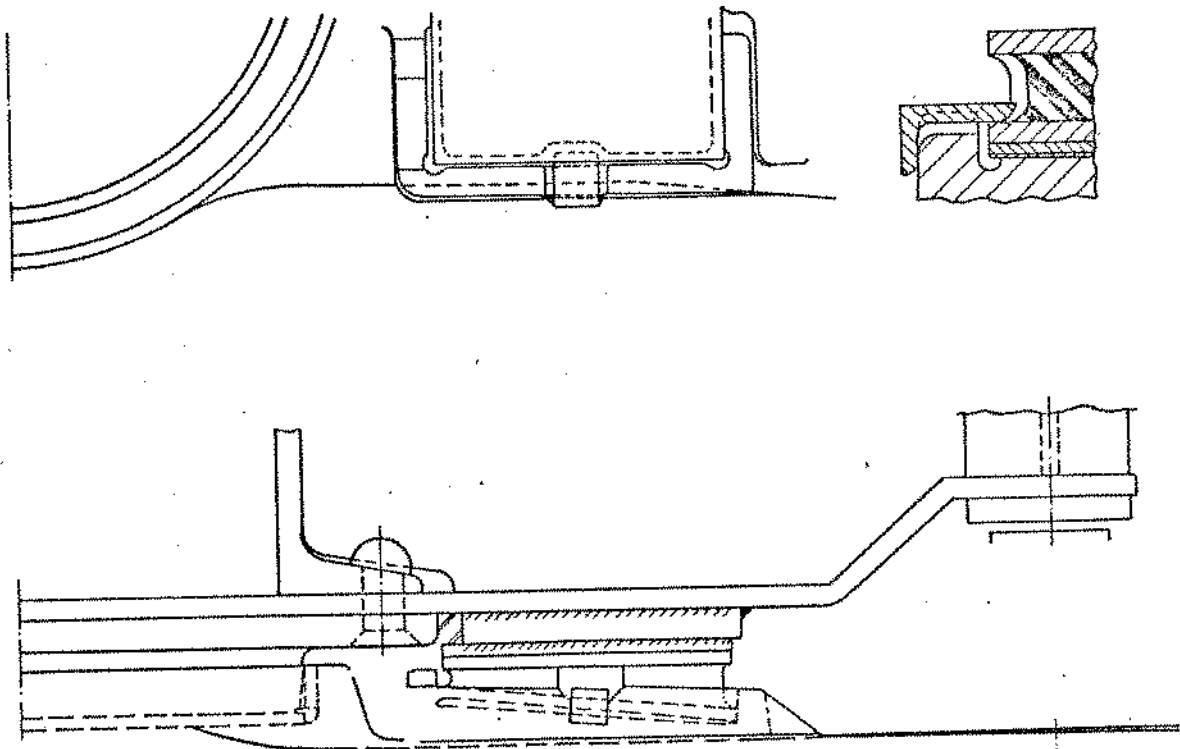


Figura 3.8 - Esquema do sistema ampara-balanço e C-PEP do truque FNV.

O C-PEP é constituído de duas placas de aço com borra-cha vulcanizada. Este conjunto é montado entre a travessa central e a caixa do vagão, com uma interferência de 6,35 mm. A função é de amortecimento de giro do truque em relação a caixa do vagão, por haver atrito de escorregamento entre a caixa e a traves-sa central, além de reduzir o balanço do vagão.

Observação: Apesar dos truques COBRASMA e FNV apresentarem a mesma composição básica de projeto (três peças), o comportamento dinâmico difere, uma vez que o sistema de amortecimento é diferen-te e os pacotes de mola têm configurações diversas. Além disso as cunhas de atrito têm dimensões diferentes influenciando na rigidez de giro das laterais contra a travessa.

### 3.1.2 - Características gerais do truque LHB

O truque de fabricação LHB projetado para a EFC é constituído de uma estrutura fechada de construção soldada, a qual está apoiada sobre as caixas de rolamentos dos rodeiros, através de feixe de molas (Fig. 3.9). Uma das extremidades das molas é ligada à estrutura através de *elo cardânico*; a outra extremidade é ligada a um balancim também através de *elo cardânico*, permitindo assim o acoplamento entre os rodeiros. O *elo cardânico* possibilita movimentos laterais e longitudinais das caixas de rolamento em relação ao truque. A estrutura do truque sustenta o vagão através de apoio esférico central, revestido de material plástico, para diminuir o atrito.

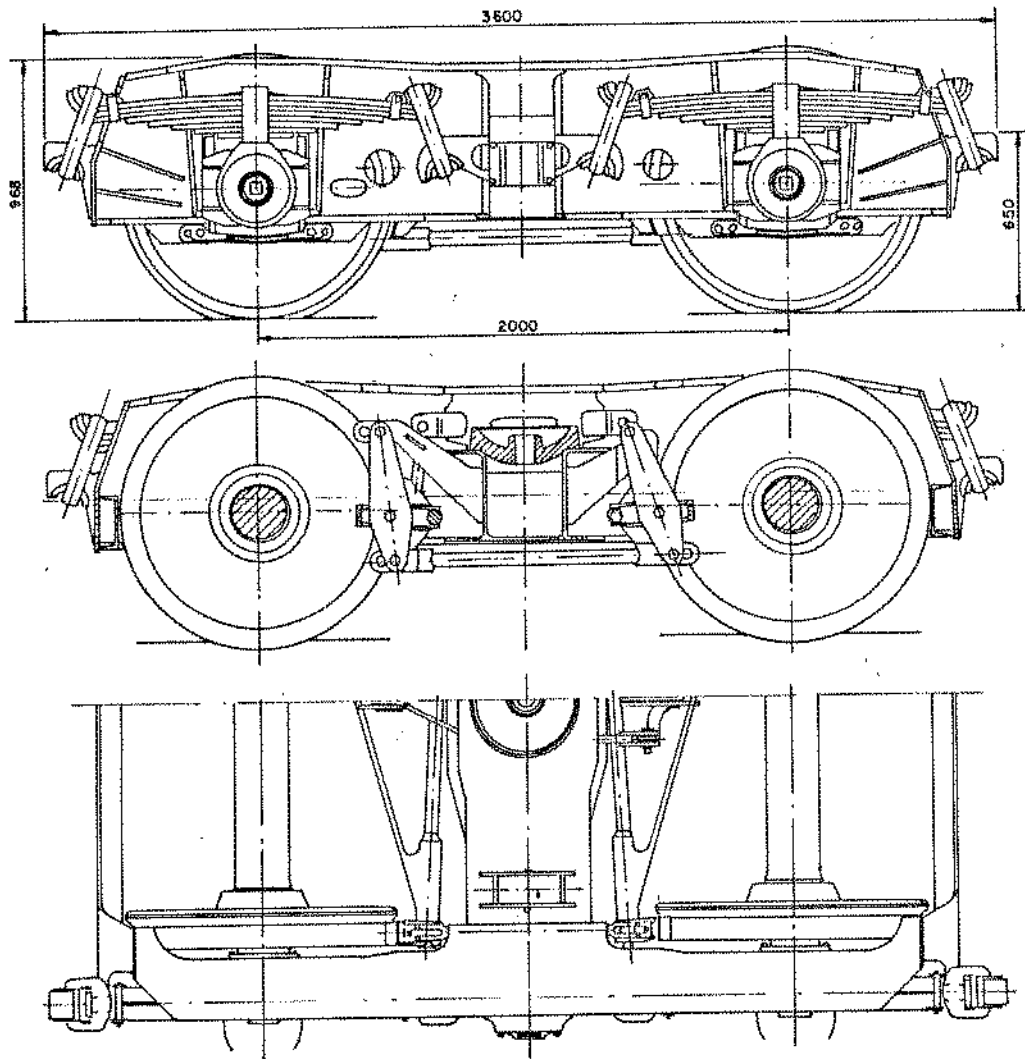


Figura 3.9 - Esquema do truque LHB.

Este sistema de suspensão na qual a ligação entre o ro-deiro e o truque se processa através de molas, é denominado *primário*. Os rodeiros têm grande mobilidade de movimento, podendo mover-se  $\pm 6$  mm na direção longitudinal e  $\pm 23$  mm na direção transversal.

O sistema de suspensão tem uma constante de mola na direção vertical  $k = 5\,405$  N/mm.

A frequência natural vertical do vagão, calculada segundo a fórmula (3.1), vale:

$$f_0 = 6,10 \text{ Hz} \quad (\text{vagão vazio})$$

$$f'_0 = 2,17 \text{ Hz} \quad (\text{vagão carregado})$$

O amortecimento é pequeno e provém do atrito entre as lâminas do feixe de molas e dos elos.

### 3.2 - Construção do carro de medição (CM) e carro auxiliar (CA)

Para a realização das viagens de teste, foram necessárias a construção de um carro de medição (CM), onde seriam instalados os instrumentos, bem como um carro auxiliar (CA) para a colocação do grupo gerador e materiais auxiliares. Este trabalho foi efetuado pela Companhia Comércio e Construção (CCC) em Cruzeiro - SP.

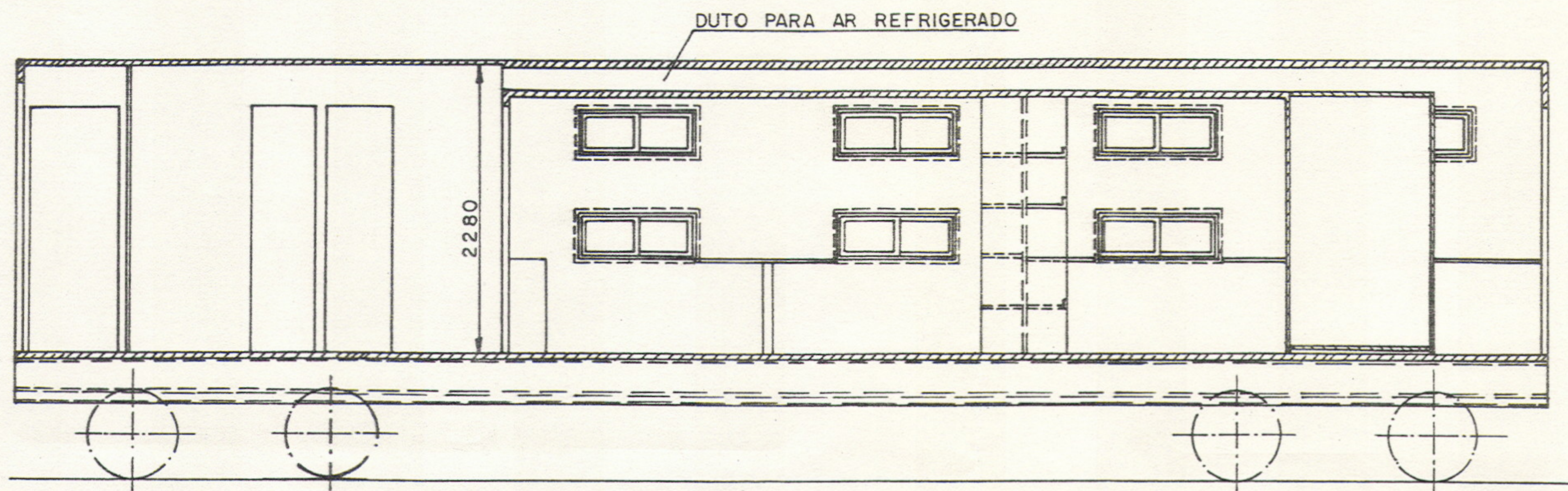
O "lay-out" do CM foi desenvolvido por nós em Abril de 1982, visando uma boa distribuição de equipamento, como também o melhor ambiente de trabalho possível (Fig. 3.10).

Foram utilizados dois carros fechados VD da Estrada de Ferro Vitória - Minas de bitola 1,0 m, de fabricação Pullman Standard Car, para serem transformados no CM e CA; foram adaptados truques de bitola 1,60 m. O processo de transformação realizado pela CCC, foi acompanhado pelo pessoal do Centro de Tecnologia da UNICAMP.

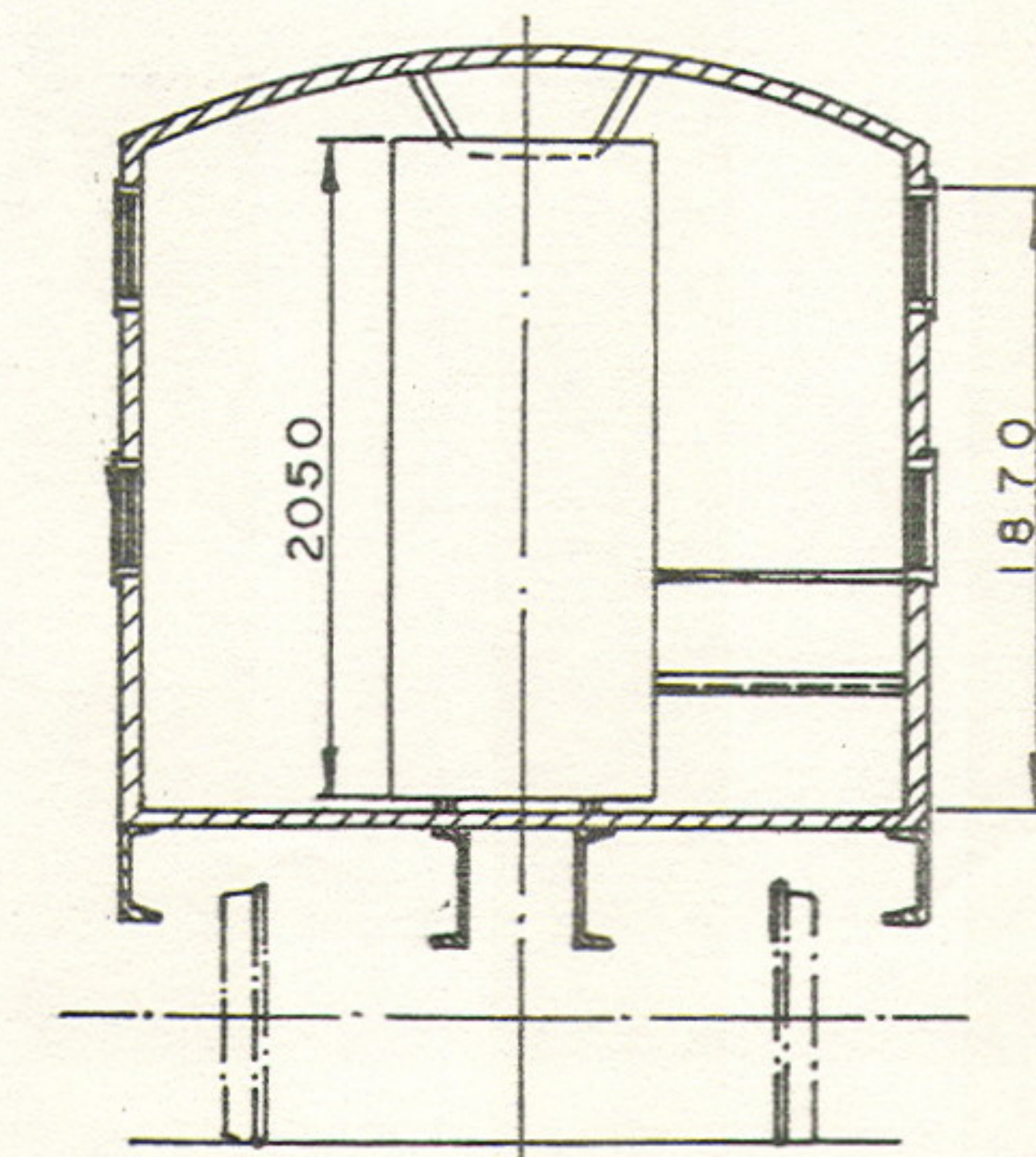








CORTE A-A



CORTE C-C

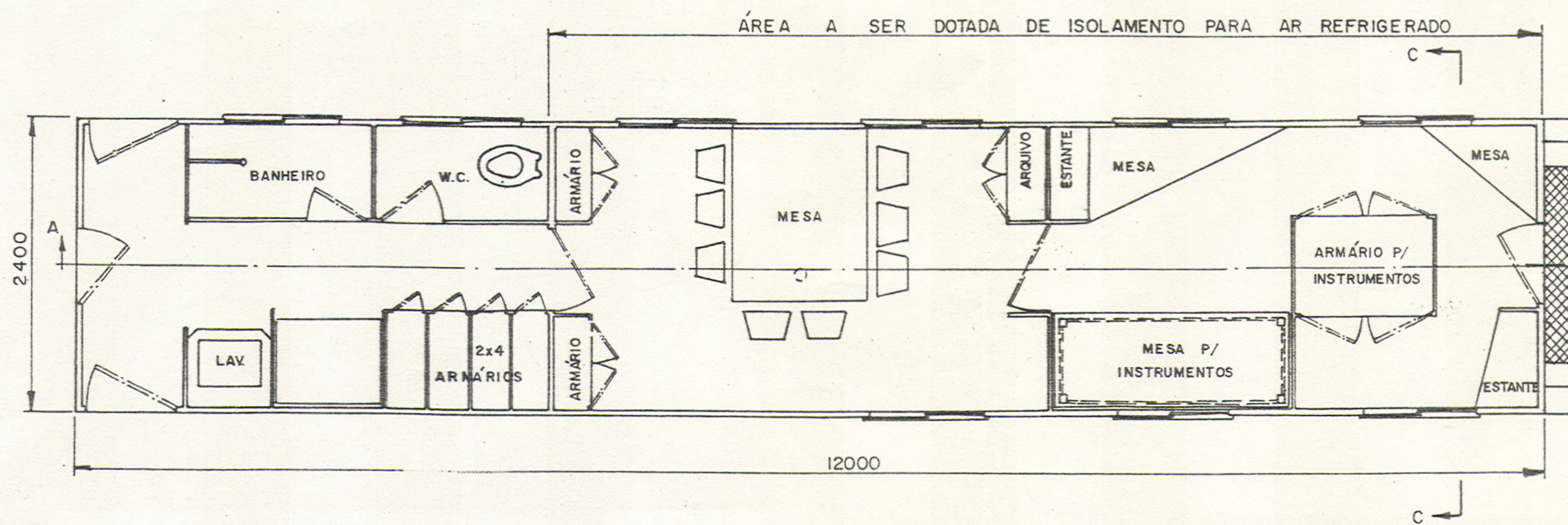


Fig. 3.10 - DESENHO DO CARRO DE MEDIÇÃO. ESCALA 1:50





Figura 3.11 - Foto da construção do carro de medição na CCC.

Após a parte interna do CM estar completamente pronta, foram instalados no armário de instrumentos, um computador analógico e aparelhos complementares.

No carro auxiliar foi colocado o grupo gerador, fornecido pela UNICAMP, como também um armário com a finalidade de se colocar células de carga, ferramentas e materiais diversos.

As figuras 3.12, 3.13 e 3.14 ilustram a fase da montagem do CM e CA.



Figura 3.12 - Montagem do grupo gerador no CA.



Figura 3.13 - Vista geral do carro de medição.





Figura 3.14 - Vista interna de um compartimento do CM.

### 3.3 - Instrumentação dos truques no Centro de Tecnologia

Os truques a serem testados na via foram preparados no Centro de Tecnologia em épocas diferentes:

- . Truque Ride Control de fabricação COBRASMA - Outubro, Novembro e Dezembro de 1982.
- . Truque Barber da Fábrica Nacional de Vagões (FNV) - Abril, Maio e Junho de 1982;
- . Truque Link Hofmann Busch (LHB), proveniente da Alemanha - Outubro, Novembro e Dezembro de 1983.

Para a avaliação do comportamento do truque, visando estabilidade, solicitações críticas na estrutura, segurança ao descarrilhamento, solicitações na via, como também para se realizar futuramente ensaios de resistência em laboratório, torna-se necessária a medida das forças entre roda e trilho para cada tipo de truque. Aproveitando-se da oportunidade das viagens de medição, as quais requerem altos custos operacionais, foram realizadas várias medições complementares, as quais permitirão futuramente o desenvolvimento de outros trabalhos.

### 3.3.1 - Grandezas medidas com o truque COBRASMA

#### a) Forças entre roda e trilho

As componentes das forças entre roda e trilho, medidas através do rodeiro instrumentado (ver item 3.4), foram:

$Y_1$  - força de guia na roda 1;

$Q_1$  - força de apoio na roda 1;

$Y_2$  - força de guia na roda 2;

$Q_2$  - força de apoio na roda 2;

$\Sigma Y$  - somatória das forças de guia;

$Y_1/Q_1$  - relação entre a força de guia e a força de apoio para a roda 1;

$Y_2/Q_2$  - relação entre a força de guia e a força de apoio para a roda 2.

#### b) Tensões na estrutura do truque

As tensões na estrutura do truque foram medidas em vários pontos, através de extensômetros elétricos. Foram lidos 15 pontos em uma lateral, 9 pontos na outra e 3 pontos na travessa. As figuras 3.15, 3.16 e 3.17 mostram os pontos medidos.

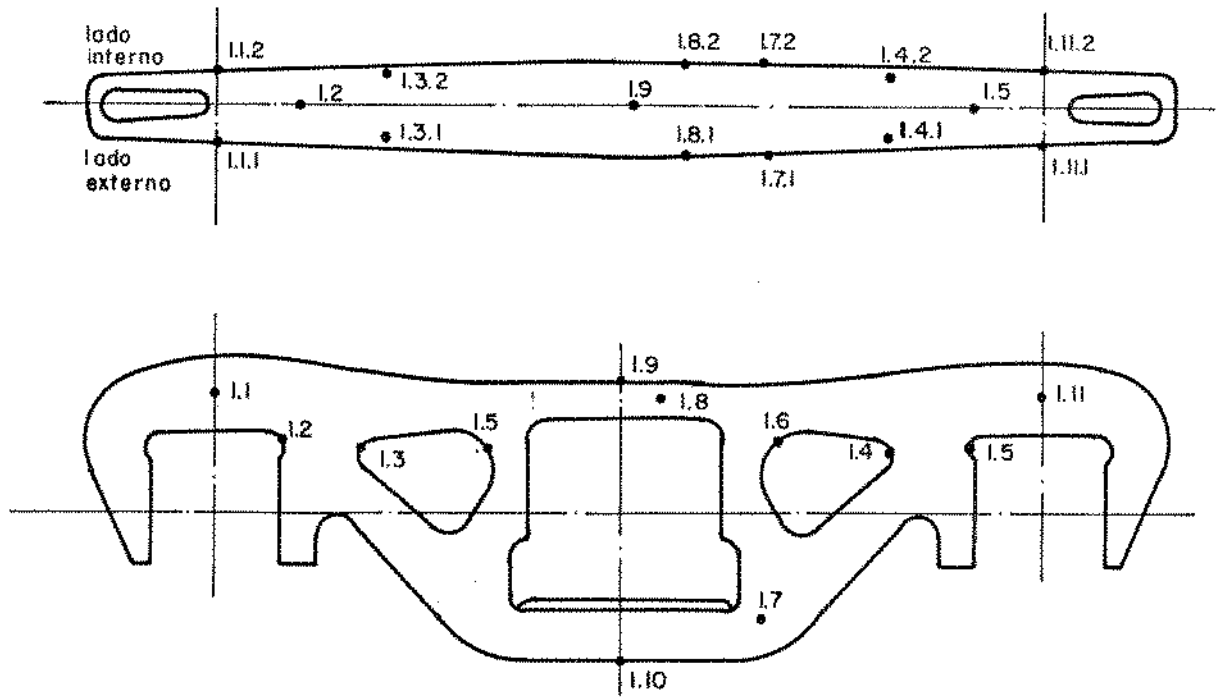


Figura 3.15 - Disposição dos extensômetros na lateral 1

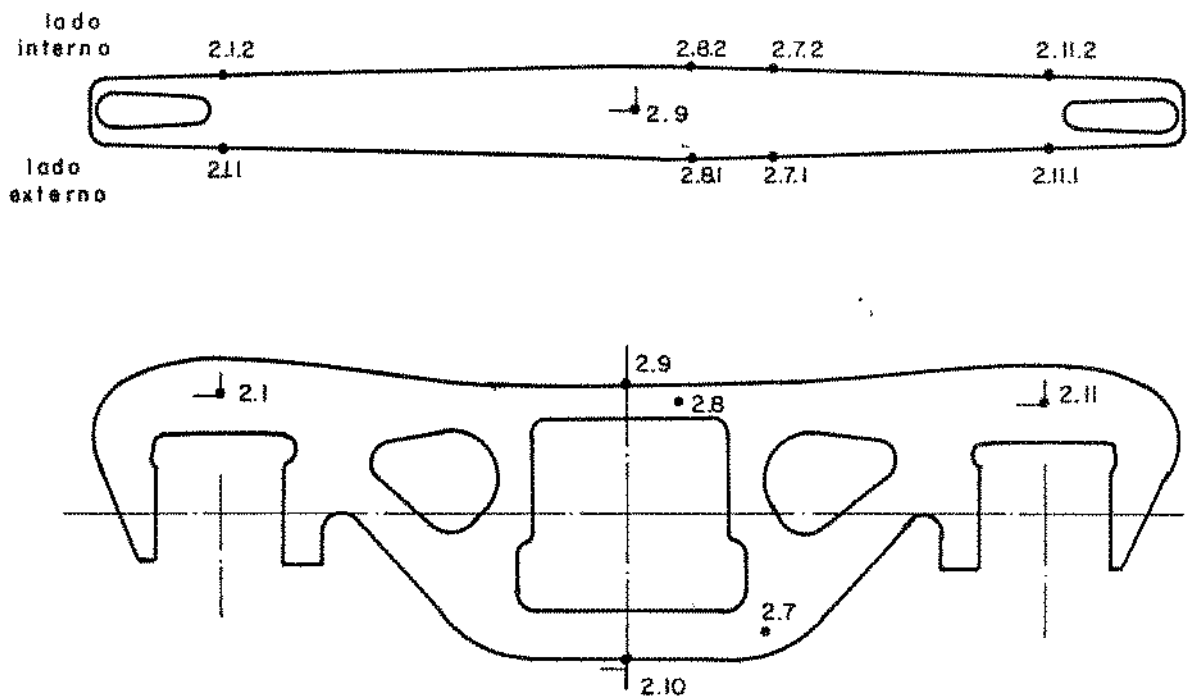


Figura 3.16 - Disposição dos extensômetros na lateral 2

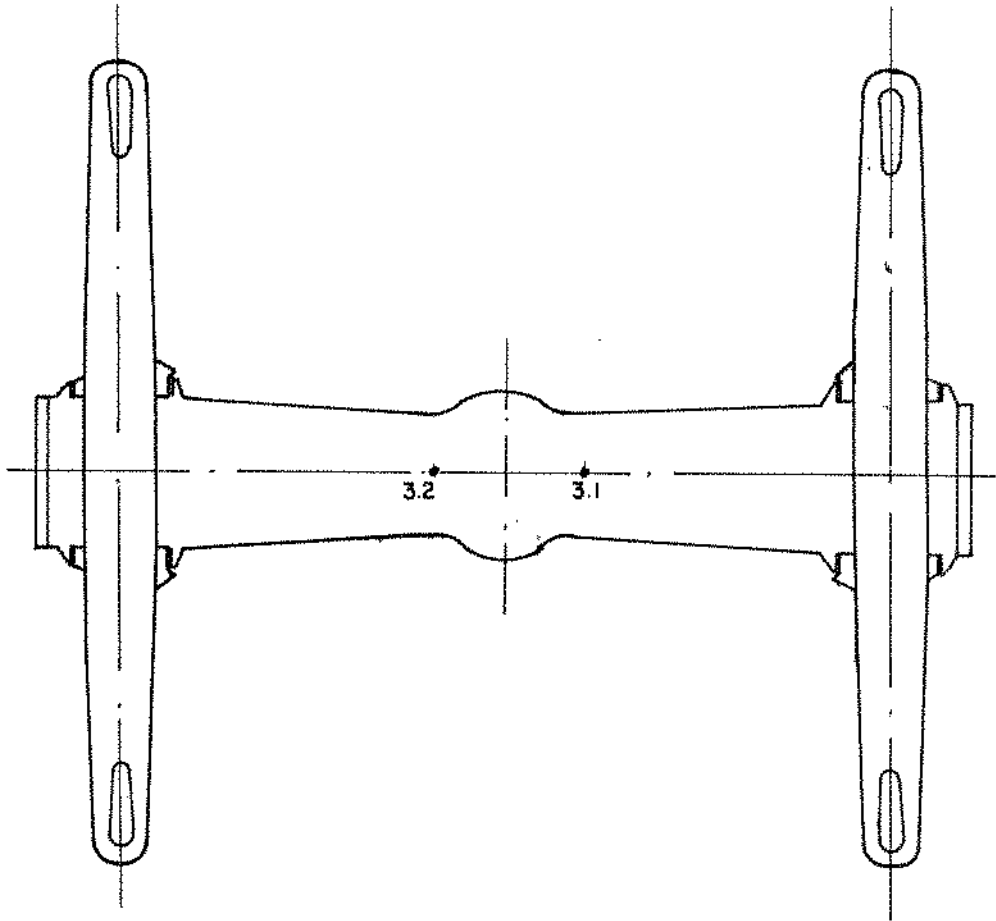


Figura 3.17 - Disposição dos extensômetros na travessa.

c) Movimentos relativos entre as partes móveis do truque

Os movimentos relativos entre as partes do truque foram medidos através de transdutores resistivos de deslocamento construídos especialmente para esse fim (Fig. 3.18). Foram medidas as seguintes grandezas:

$e_{y1}$  - deslocamento transversal relativo da travessa em relação à lateral 1;

$e_{y2}$  - deslocamento transversal relativo da travessa em relação à lateral 2;

$e_{z1}$  - deslocamento vertical relativo da travessa em relação à lateral 1;

$e_{z2}$  - deslocamento vertical relativo da travessa em relação à lateral 2.

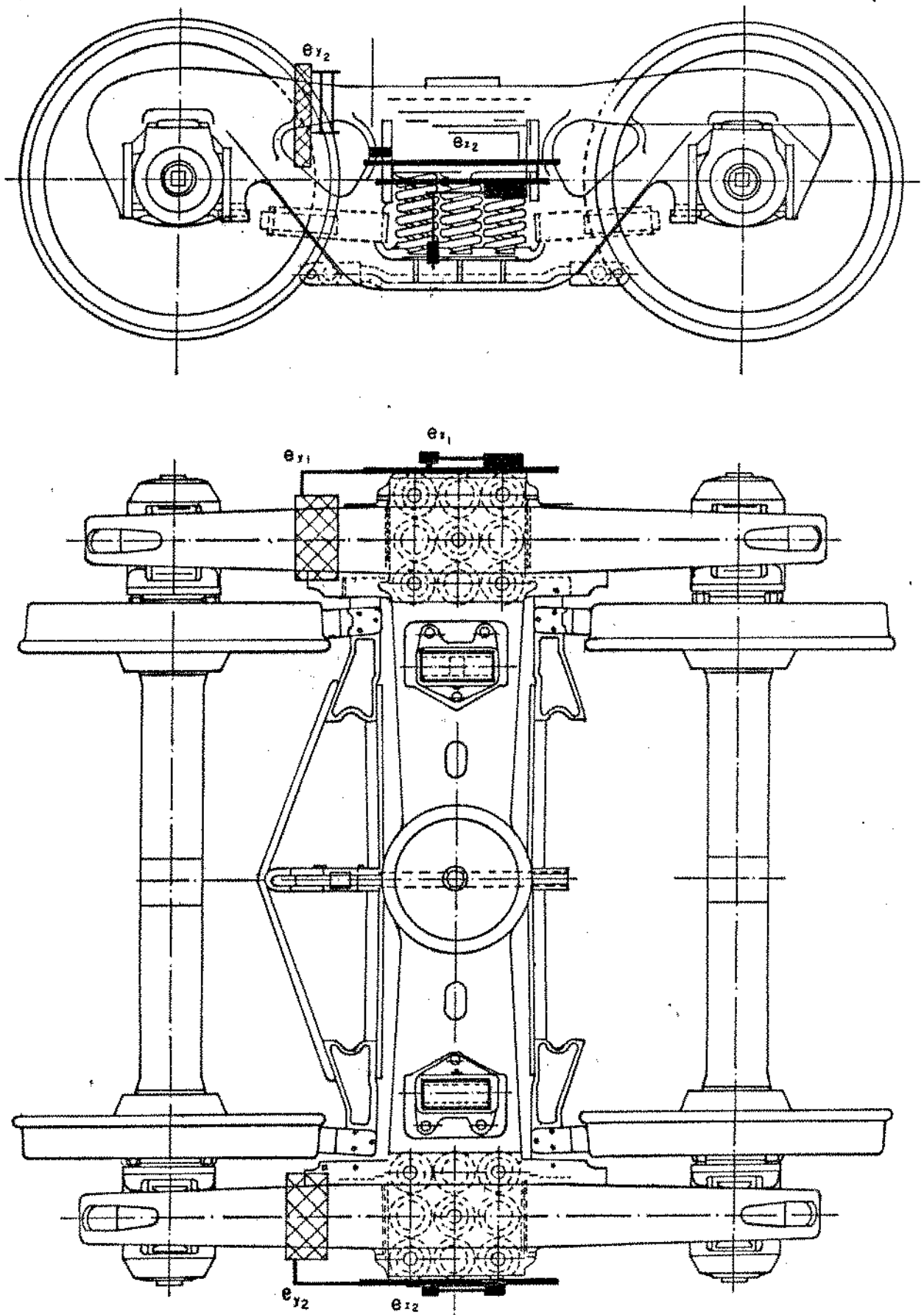


Figura 3.18 - Desenho indicativo dos captadores de lâmi  
nas montadas no truque.

3.3.2 - Grandezas medidas com o truque FNV

a) Forças entre roda e trilho

As mesmas citadas no item 3.3.1-a para o truque COBRASMA.

b) Tensões na estrutura do truque

O número de pontos para a medida das tensões na estrutura do truque FNV, foi menor que aquele utilizado com o truque COBRASMA, uma vez que, por ocasião das viagens de medição com este truque, verificou-se que apenas alguns pontos foram significativos. As figuras 3.19, 3.20 e 3.21 ilustram as disposições dos extensômetros.

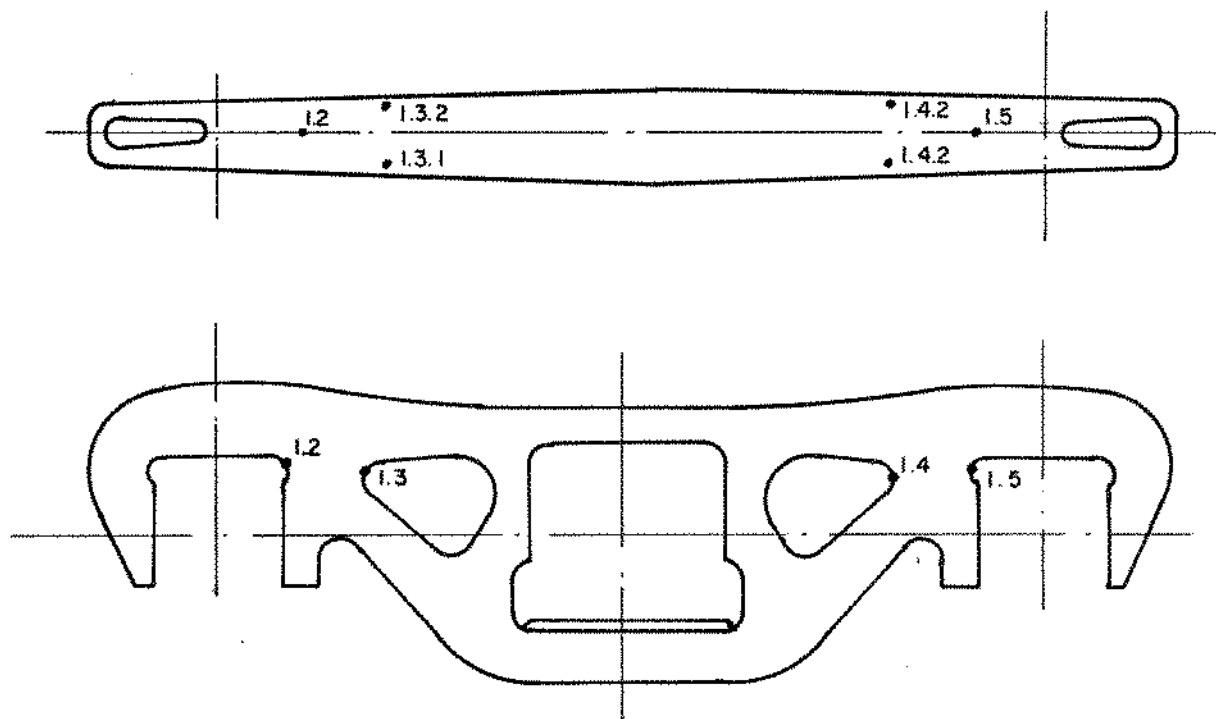


Figura 3.19 - Disposição dos extensômetros na lateral 1.

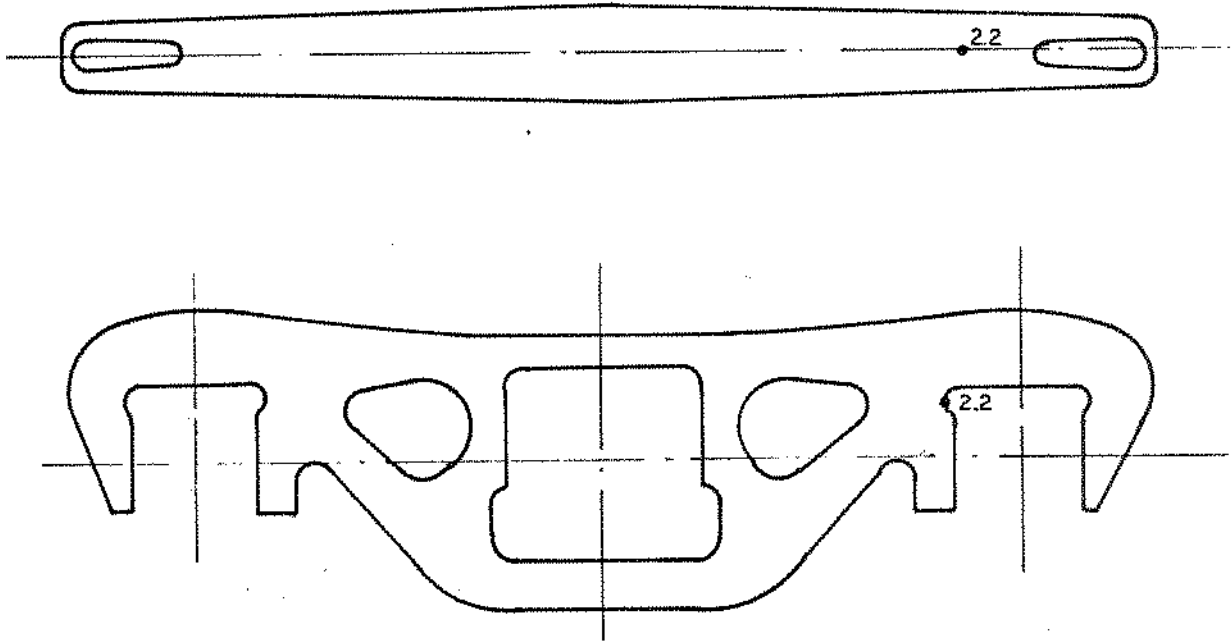


Figura 3.20 - Disposição dos extensômetros na lateral 2

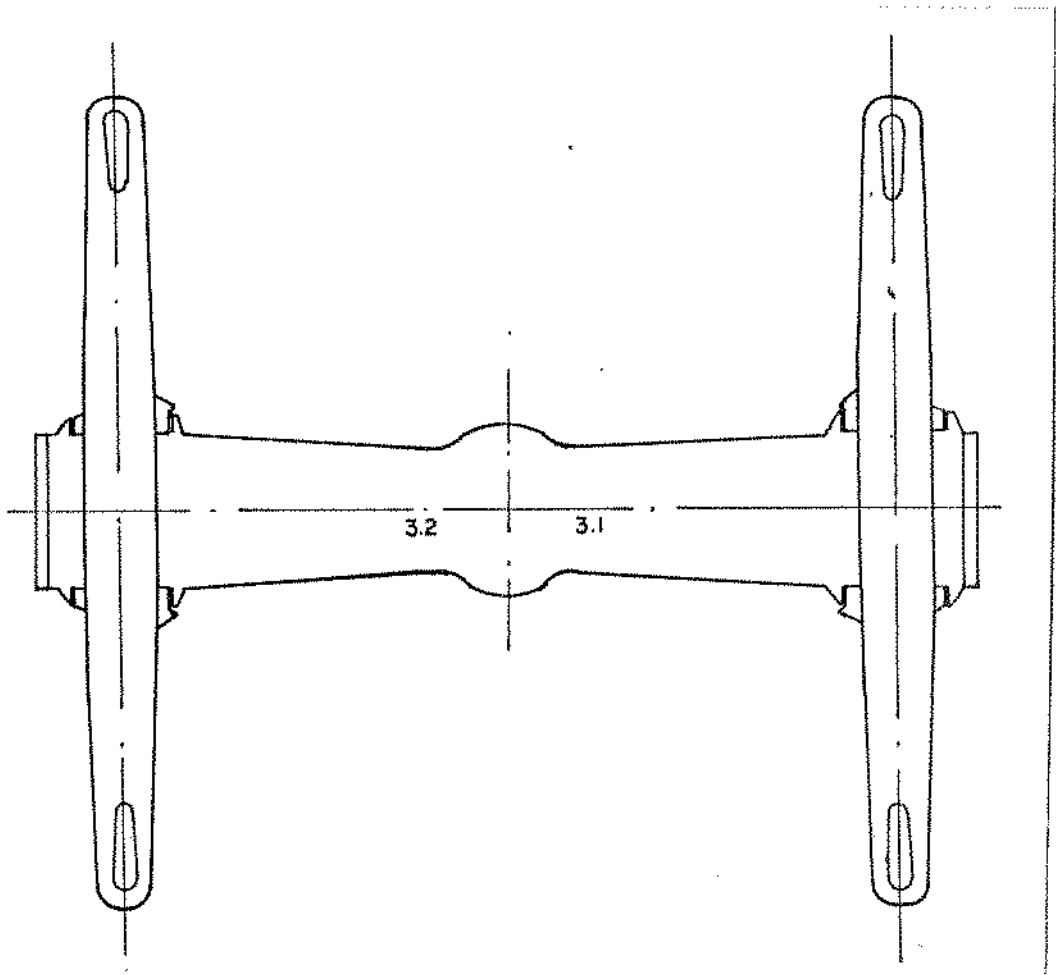


Figura 3.21 - Disposição dos extensômetros na travessa



c) Movimentos relativos entre as partes móveis do truque

Os mesmos citados no item 3.3.1-a para o truque COBRAS-  
MA

d) Aceleração vertical e horizontal da caixa do vagão de minério

Foram medidas as acelerações vertical e transversal da caixa do vagão, próximo ao prato central, através de transdutores absolutos de acelerações (Fig: 3.22).



Figura 3.22-Transdutores de aceleração transversal da caixa do vagão.

### 3.3.3 - Grandezas medidas com o truque LHB

a) Forças entre roda e trilho

As mesmas citadas no item 3.3.1-a para o truque COBRAS-  
MA.

b) Tensões na estrutura do truque

Foram colados extensômetros elétricos nos pontos indicados na figura 3.23.

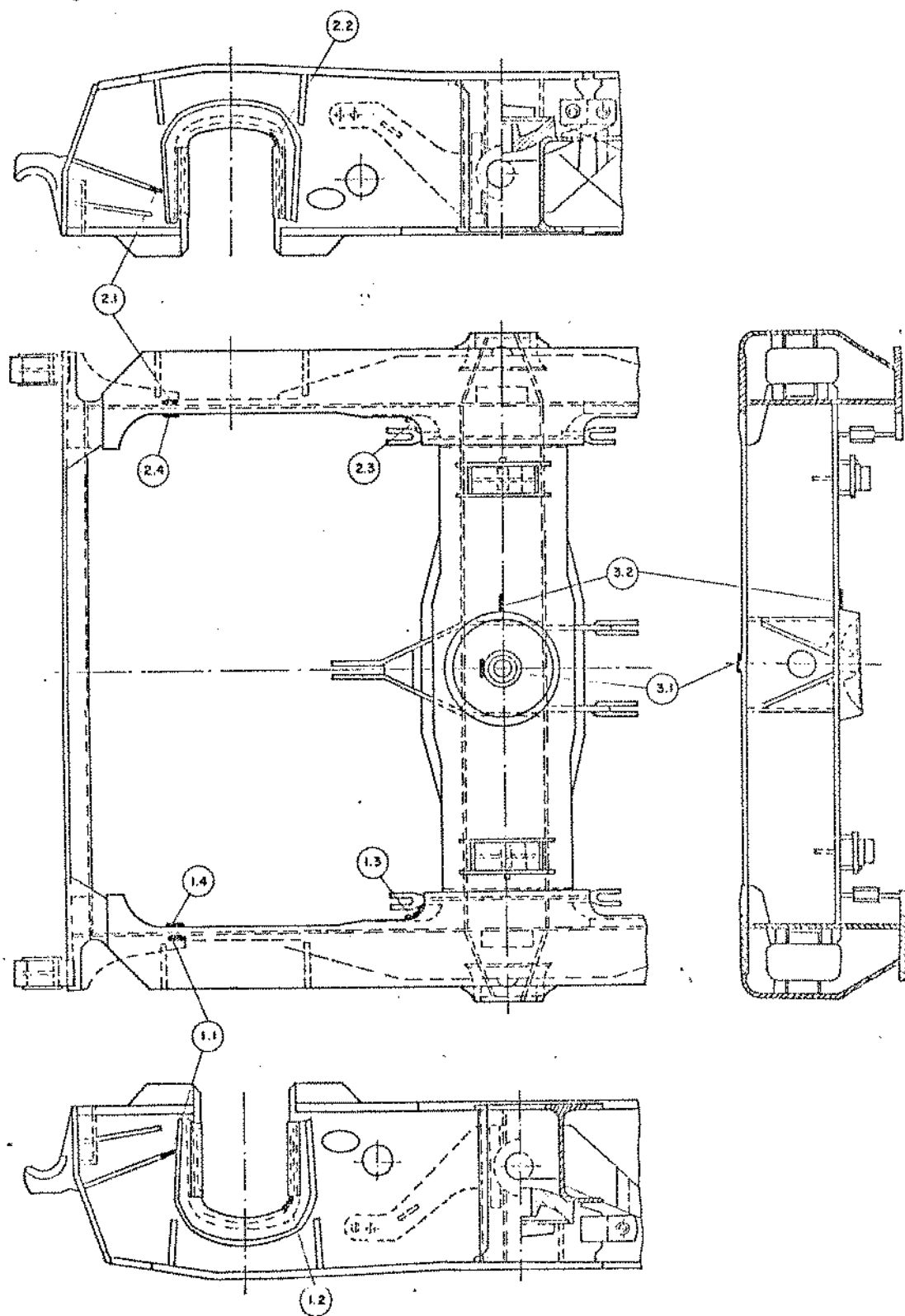


Figura 3.23 - Disposição dos extensômetros elétricos no truque.

c) Movimentos relativos entre o rodeiro e a estrutura do truque

Foram registradas as seguintes grandezas:

- $d_{y1}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado;
- $d_{y2}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 2 do 2º rodeiro do 1º truque;
- $d_{y3}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 3 do 1º rodeiro do 2º truque;
- $d_{y4}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 4 do 2º rodeiro do 2º truque;
- $d_{y5}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 5 do 1º rodeiro do 3º truque;
- $d_{y6}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 6 do 2º rodeiro do 3º truque;
- $d_{y7}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 7 do 1º rodeiro do 4º truque;
- $d_{y8}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 8 do 2º rodeiro do 4º truque;
- $d_{x1}$  - deslocamento relativo longitudinal da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado;
- $d_{x2}$  - deslocamento relativo longitudinal da caixa de rolamento 2 do rodeiro instrumentado;
- $d_{x12}$  - deslocamento relativo longitudinal do centro do rodeiro instrumentado;
- $\phi$  - deslocamento relativo angular do rodeiro instru-

mentado;

$d_{z1}$  - deslocamento relativo vertical da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado;

$d_{y21}$  - deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 1 medido em relação a um ponto distinto ao utilizado na grandeza  $d_{y1}$ .

d) Aceleração vertical e transversal da caixa do vagão de minério

Foram medidas as acelerações vertical e transversal da caixa do vagão, próximo ao prato central, através de transdutores absolutos de acelerações:

BH - aceleração lateral da caixa do vagão;

BV - aceleração vertical da caixa do vagão.

e) Aceleração lateral da caixa de rolamento

Foi medida a aceleração lateral  $B_r$ , na extremidade da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado.

f) Acelerações laterais na estrutura do truque

Foram medidas as seguintes acelerações laterais na extremidade superior de cada um dos quatro truques dos vagões de minério:

$B_1$  - aceleração lateral da estrutura do 1º truque;

$B_2$  - aceleração lateral da estrutura do 2º truque;

$B_3$  - aceleração lateral da estrutura do 3º truque;

$B_4$  - aceleração lateral da estrutura do 4º truque.

### g) Rodas reperfiladas

Foram realizadas medições das grandezas  $d_{x2}$ ,  $BV$ ,  $Br$ ,  $d_{x1}$ ,  $d_{y1}$ ,  $d_{z1}$ , 3.3 e 3.1 nas velocidades de 70 km/h e 80 km/h com banda de rolamento ORE 1002.

### 3.4 - Procedimento de medição com o Rodeiro Instrumentado

Com o aumento da velocidade de tráfego e maiores cargas por eixo, torna-se necessário conhecer o comportamento do veículo na via, sendo, portanto, imprescindível o conhecimento das reações que surgem entre roda e trilho. Para a determinação direta destas reações, foi desenvolvido nos últimos anos na Alemanha, o processo de medição conhecido como *Rodeiro Instrumentado* [4]. O método indireto utilizado anteriormente para determinação dessas forças, baseia-se em medidas de acelerações com as quais posteriormente as reações são calculadas. Este procedimento indireto apresenta erros intermediários bastante significativos, o que não acontece através de uma medição direta.

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi instrumentado pelo Instituto de Pesquisas de Minden - Alemanha, um rodeiro de procedência da CVRD. Esta instrumentação foi acompanhada pelo autor do presente trabalho, durante o seu estágio naquele instituto. O objeto deste acompanhamento foi a absorção da tecnologia do Rodeiro Instrumentado para o Brasil.

Como este procedimento de medição não é ainda empregado em todos os institutos ferroviários, devido a complexidade do sistema, achamos por bem incluir neste trabalho o princípio de medição, a instrumentação eletrônica utilizada e considerações sobre a calibração.

#### 3.4.1 - Princípio de medição

O princípio de medição do *rodeiro instrumentado*, consiste na determinação dos momentos fletores, que surgem em planos bem definidos no eixo do rodeiro, quando o mesmo instalado no veí

culo, trafega na via. Através deste, são determinadas as três componentes das forças em cada roda. Apresenta-se em seguida o desenvolvimento teórico.

A figura 3.24 mostra um rodeiro com as forças nele atuantes. Num sistema de referência  $x, y, z$ , tem-se as componentes das forças, sendo que a direção  $z$  é sempre perpendicular a via, a direção  $y$  é a direção do eixo do rodeiro e a direção  $x$  a direção do movimento. Este sistema translada com o rodeiro mas roda com ele.

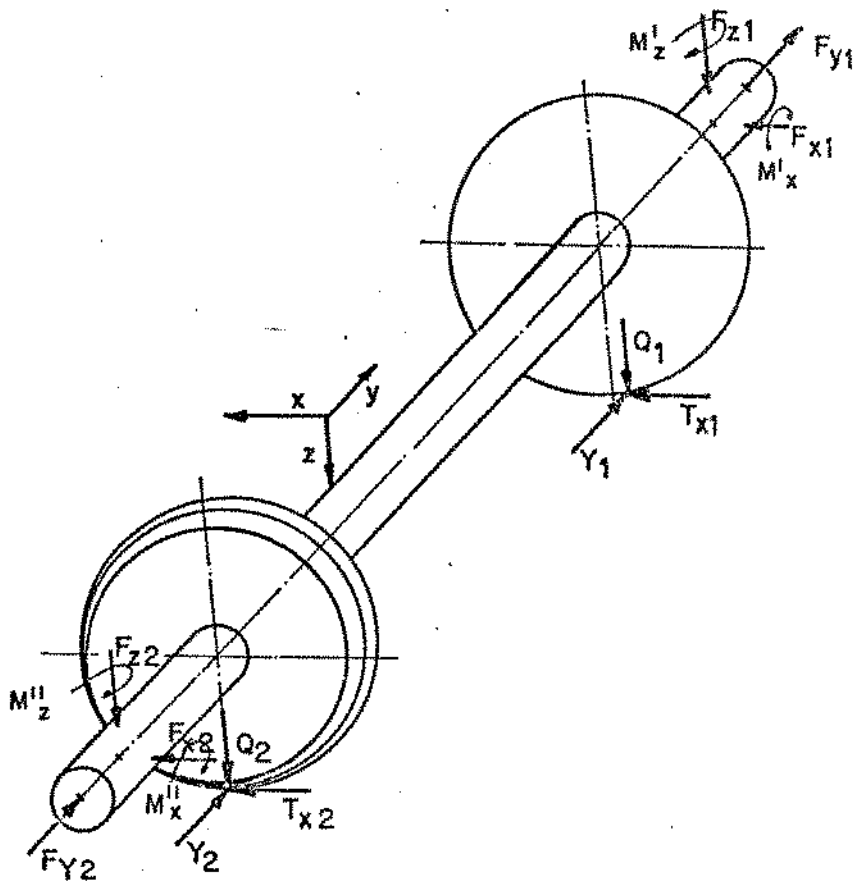


Figura 3.24 - Forças atuantes no rodeiro.

De acordo com a figura 3.24 tem-se:

$Y_1, Y_2$  - forças laterais entre roda e trilho, chamadas forças de guia.

$Q_1, Q_2$  - forças verticais entre roda e trilho, chamadas forças verticais de apoio.

$T_{x1}, T_{x2}$  - forças longitudinais entre roda e trilho, cha

ma das forças de atrito

$F_{x1}, F_{x2}$  - forças radiais longitudinais do mancal.

$F_{y1}, F_{y2}$  - forças axiais do mancal.

$F_{z1}, F_{z2}$  - forças radiais verticais do mancal.

$M'_x, M''_x, M'_z, M''_z$  - momentos nos mancais

Através do *rodeiro instrumentado* pode determinar-se cada uma dessas componentes. Com relação às forças do mancal  $F_{y1}$  e  $F_{y2}$ , apenas sua soma pode ser determinada pelo *rodeiro instrumentado*. Para a determinação individual de cada uma dessas componentes, é necessária também a utilização de outras células de carga, instaladas nos mancais do *rodeiro*.

Os primeiros *rodeiros instrumentados* desenvolvido na Alemanha possuíam 4 planos de medição [5]; já os mais modernos, como no nosso caso, utilizam 6 planos de medição [6]. Desta forma, tem-se um aumento da precisão de medição. A figura 3.25 mostra um *rodeiro* com os planos de medição indicados.

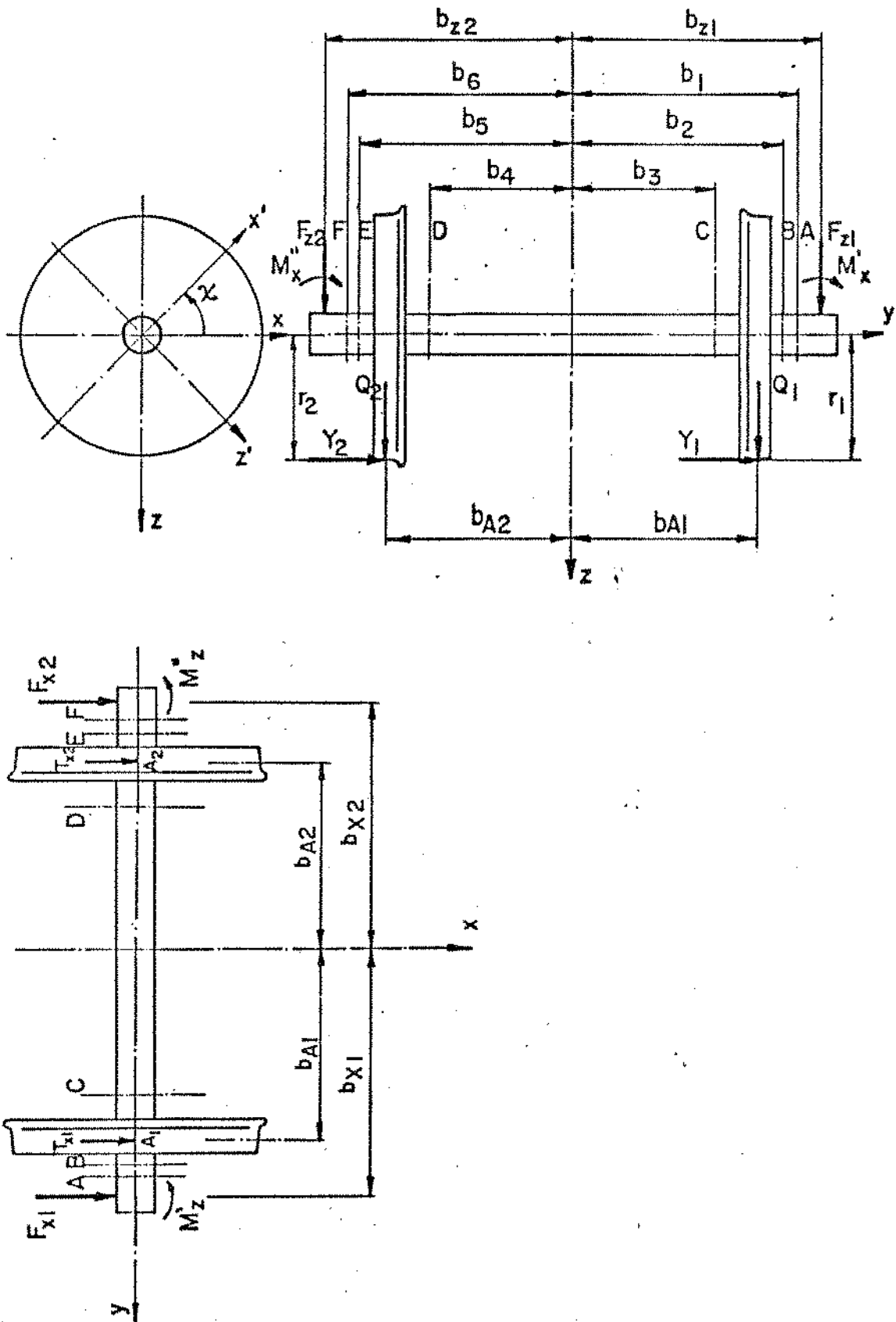


Figura 3.25 - Rodeiro instrumentado com os planos de medição.



Primeiramente serão calculados os momentos fletores em relação ao eixo x, em cada plano de medição.

Pela utilização da figura 3.25, determinam-se os momentos fletores em cada um dos planos.

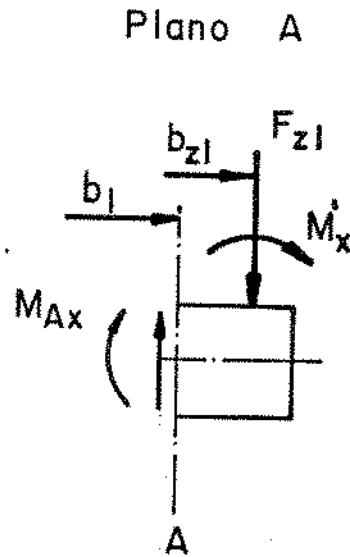


Figura 3.26 - Indicação do momento fletor no plano A.

$$M_{Ax} = F_{z1} (b_{z1} - b_2) + M'_x \quad (3.2)$$

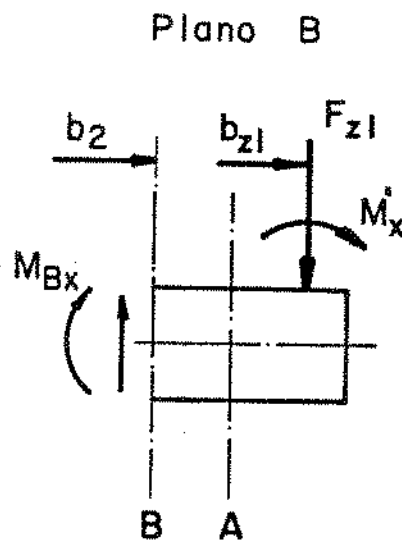


Figura 3.27 - Indicação do momento fletor no plano B.

$$M_{Bx} = (b_{z1} - b_2) F_{z1} + M'_x \quad (3.3)$$

Plano C

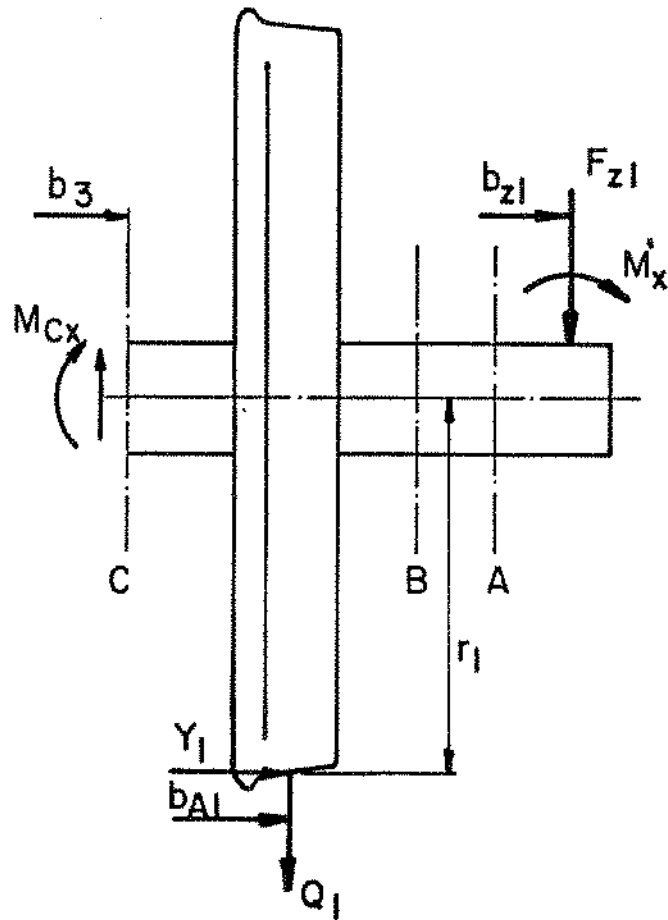


Figura 3.28 - Indicação do momento fletor no plano C.

$$M_{Cx} = (b_{z1} - b_3) F_{z1} + M'_x + (b_{A1} - b_3) Q_1 - r_1 Y_1 \quad (3.4)$$

De modo análogo pode-se calcular os momentos nos planos D, E e F.

Plano D

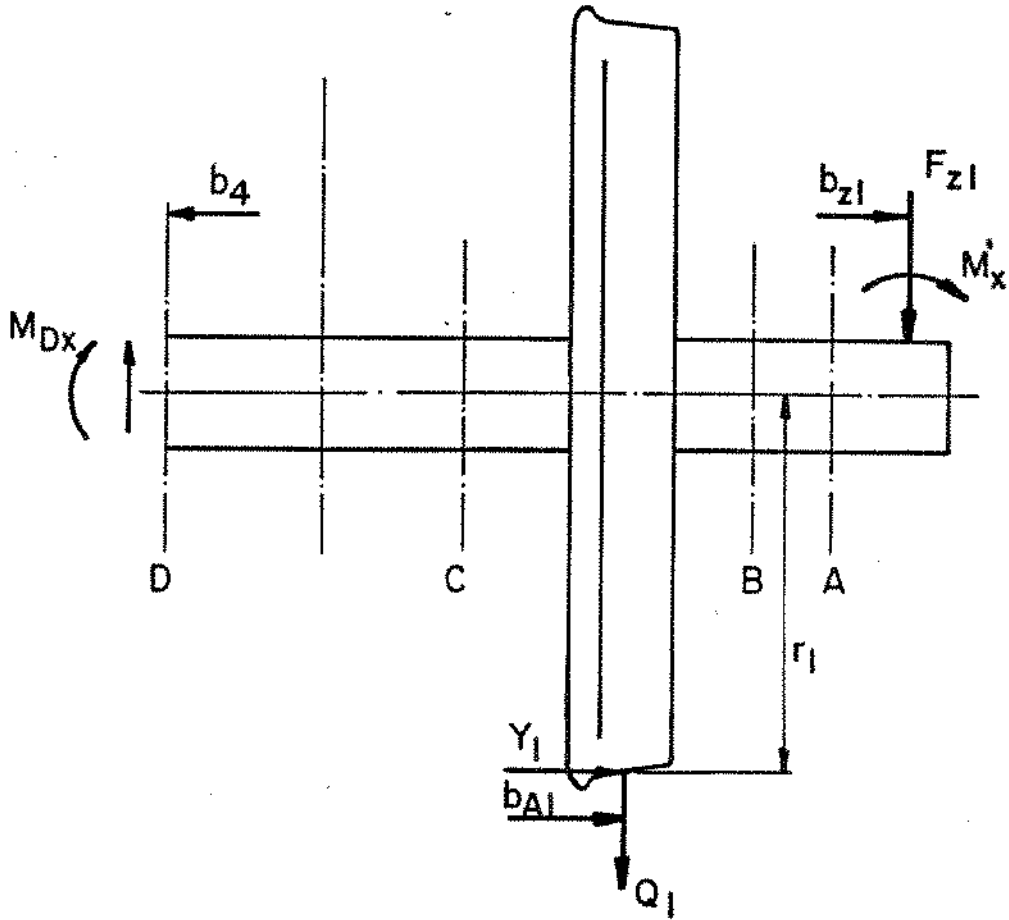


Figura 3.29 - Indicação do momento fletor no plano D.

$$M_{Dx} = (b_{z1} + b_4) F_{z1} + M'_x + (b_{A1} + b_4) Q_1 - Y_1 r_1 \quad (3.5)$$

Plano E

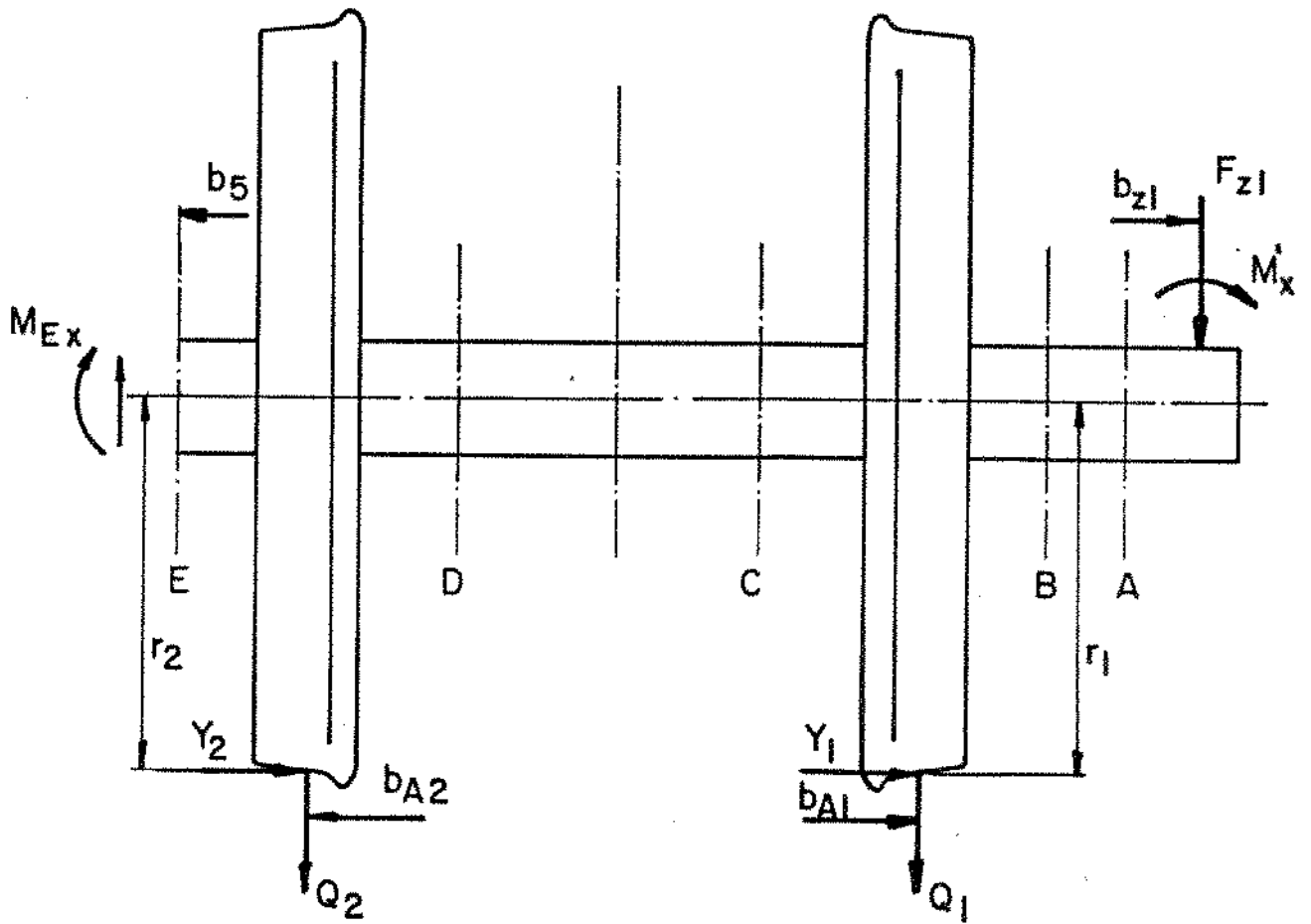


Figura 3.30 - Indicação do momento fletor no plano E.

$$M_{Ex} = (b_{z1} + b_5)F_{z1} + M'_x + (b_{A1} + b_5)Q_1 - r_1 Y_1 - r_2 Y_2 + (b_6 - b_{A2}) Q_2$$

(3.6)

Plano F

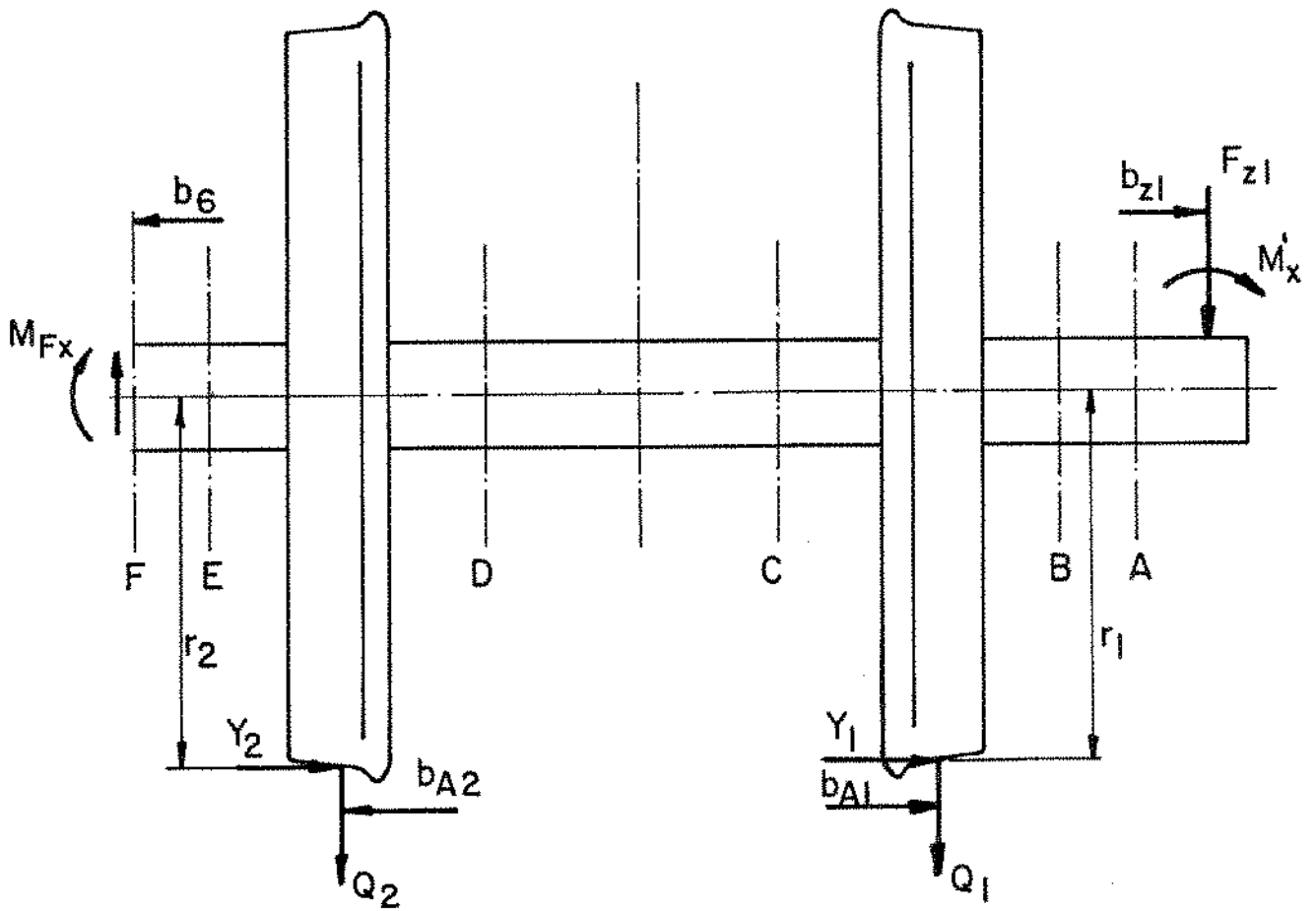


Figura 3.31 - Indicação do momento fletor no plano F:

$$M_{Fx} = (b_{z1} + b_6) F_{z1} + M'_x + (b_{A1} + b_6) Q_1 - r_1 Y_1 - r_2 Y_2 + (b_6 - b_{A2}) Q_2$$

(3.7)

As expressões (3.2) a (3.7) formam um sistema de 6 equações com as 6 incógnitas  $Y_1, Y_2, Q_1, Q_2, F_{z1}$  e  $M'_x$ . Pela utilização das equações do equilíbrio, calculam-se também  $F_{z2}$  e  $M''_x$ . As componentes  $F_{x1}, F_{x2}, M'_z, M''_z, T_{x1}, T_{x2}$  são calculadas analogamente, considerando os momentos fletores em relação ao eixo z.

Resumindo tem-se as forças e os momentos nos mancais:

$$F_{x1} = \frac{l}{b_1 - b_2} M_{Bz} - \frac{l}{b_1 - b_2} M_{Az} \quad (3.8)$$

$$F_{z1} = \frac{l}{b_1 - b_2} M_{Bx} - \frac{l}{b_1 - b_2} M_{Ax} \quad (3.9)$$

$$F_{x2} = \frac{l}{b_6 - b_5} M_{Ez} - \frac{l}{b_6 - b_5} M_{Fz} \quad (3.10)$$

$$F_{z2} = \frac{l}{b_6 - b_5} M_{Ex} - \frac{l}{b_6 - b_5} M_{Fx} \quad (3.11)$$

$$M'_x = - \frac{b_{z1} - b_1}{b_1 - b_2} M_{Bx} + \frac{b_{z1} - b_1}{b_1 - b_2} M_{Ax} \quad (3.12)$$

$$M'_z = - \frac{b_{z1} - b_1}{b_1 - b_2} M_{Bz} + \frac{b_{z1} - b_1}{b_1 - b_2} M_{Az} \quad (3.13)$$

$$M''_x = \frac{b_{z2} - b_6}{b_6 - b_5} M_{Ez} + \frac{b_{z2} - b_5}{b_6 - b_5} M_{Fz} \quad (3.14)$$

$$M''_z = \frac{b_{z2} - b_6}{b_6 - b_5} M_{Ex} + \frac{b_{z2} - b_5}{b_6 - b_5} M_{Fx} \quad (3.15)$$

As componentes entre roda e trilho são dadas por:

$$Y_i = - \frac{b_2 - b_{A1}}{(b_1 - b_2)r_1} M_{Ax} + \frac{b_1 - b_{A1}}{(b_1 - b_2)r_1} M_{Bx} - \frac{b_{A1} + b_4}{(b_3 + b_4)r_1} M_{Cx} + \frac{b_{A1} - b_1}{(b_1 + b_4)r_1} M_{Dx} \quad (3.16)$$

$$Y_2 = \frac{b_5 - b_{A2}}{(b_6 - b_5)r_2} M_{FX} - \frac{b_2 - b_{A2}}{(b_6 - b_5)r_2} M_{EX} + \frac{b_{A2} + b_3}{(b_3 + b_4)r_2} M_{DX} - \frac{b_6 - b_{A2}}{(b_1 + b_4)r_2} M_{CX} \quad (3.17)$$

$$Q_1 = \frac{1}{b_1 - b_2} M_{Ax} - \frac{1}{b_1 - b_2} M_{Bx} - \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Cx} + \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Dx} \quad (3.18)$$

$$Q_2 = \frac{1}{b_6 - b_5} M_{Ex} - \frac{1}{b_6 - b_5} M_{Ex} - \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Dx} + \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Cx} \quad (3.19)$$

$$T_{x1} = \frac{1}{b_1 - b_2} M_{Az} - \frac{1}{b_1 - b_2} M_{Bz} - \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Cz} + \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Dz} \quad (3.20)$$

$$T_{x2} = \frac{1}{b_6 - b_5} M_{Fz} - \frac{1}{b_6 - b_5} M_{Ez} - \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Dz} + \frac{1}{b_3 + b_4} M_{Cz} \quad (3.21)$$

Com relação aos momentos fletores, os mesmos são função da tensão e do módulo de resistência para cada secção. As tensões por sua vez são referidas ao sistema x, y, z, o qual translada com o eixo mas não roda com ele. O procedimento usado para a determinação dessas tensões é baseado na utilização de um sistema de referência x', y', z', fixo ao rodeiro. Nesses eixos e em cada plano de medição foram colados oito extensômetros elétricos, com a finalidade de se determinar as deformações (Fig. 3.32 e 3.33), que pela aplicação da lei de Hooke determinam-se as tensões.

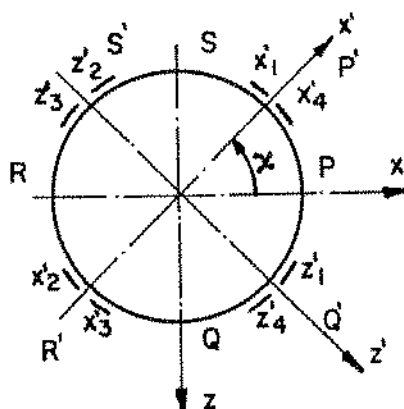


Figura 3.32 - Posicionamento dos extensômetros elétricos em um plano de medição, indicando os dois sistemas de referência.

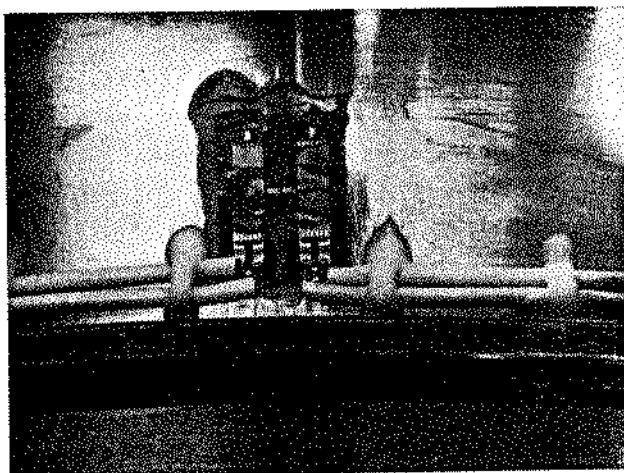


Figura 3.33 - Extensômetros elétricos colados no eixo do rodeiro.

Através das fórmulas de transformação dadas pelas equações (3.22) e (3.23), calculam-se as tensões no sistema original.

$$\sigma_P = \sigma_{P'} \cos X - \sigma_{Q'} \sin X \quad (3.22)$$

$$\sigma_Q = \sigma_{P'} \sin X + \sigma_{Q'} \cos X \quad (3.23)$$

Sendo:



$\sigma_{P'}$  = tensão na direção  $y$  no ponto  $P'$ .

$\sigma_{Q'}$  = tensão na direção  $y$  no ponto  $Q'$ .

$\sigma_P$  = tensão na direção  $y$  no ponto  $P$ .

$\sigma_Q$  = tensão na direção  $y$  no ponto  $Q$ .

Desta forma pode determinar-se os momentos fletores em função das deformações no sistema  $x'$ ,  $z'$ , para cada plano de medição.

$$M_{ix} = W_i E (\epsilon_{iP'} \text{ sen } \chi + \epsilon_{iQ'} \text{ cos } \chi) \quad (3.24)$$

$$M_{iz} = W_i E (\epsilon_{iP'} \text{ cos } \chi - \epsilon_{iQ'} \text{ sen } \chi) \quad (3.25)$$

onde:  $i = A, B, C, D, E$  e  $F$

#### 3.4.2 - Circuito elétrico para medida das deformações

Cada conjunto de quatro extensômetros, indicados nas figuras 3.32 e 3.33, são ligados em pontes de Wheatstone, conforme indicado na figura 3.34. [7]

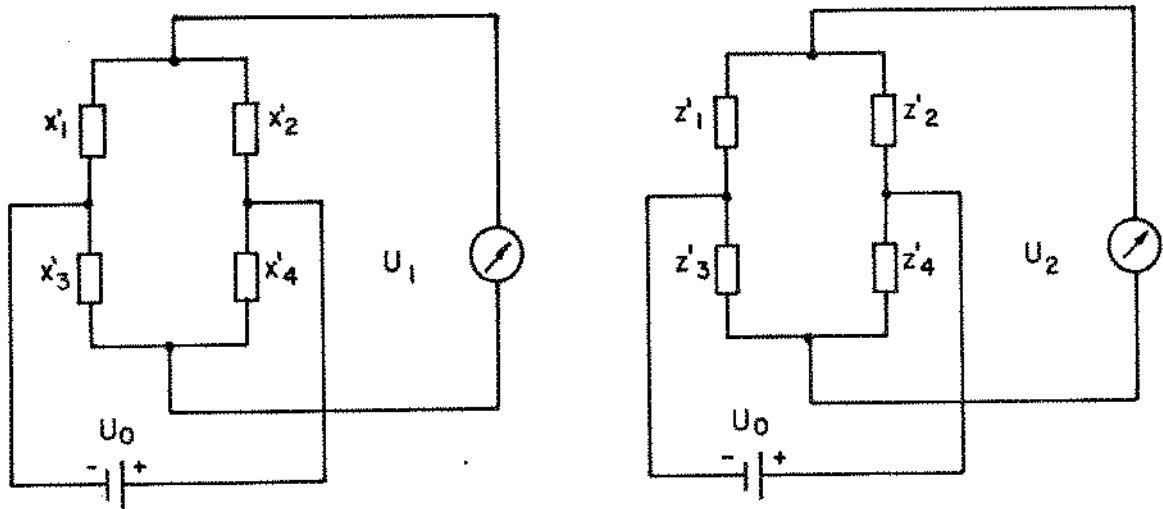


Figura 3.34 - Indicação da ligação em ponte Wheatstone dos extensômetros.  $U_0$  = tensão elétrica de alimentação.  $U_1$  e  $U_2$  = tensões elétricas medidas.

Por condições de simetria e pelo circuito de ponte tem-se:

$$U_1 = K_1 U_0 \epsilon_{p'}$$

$$U_2 = K_2 U_0 \epsilon_{q'}$$

Onde  $K_1$  e  $K_2$  são os fatores dos extensômetros, os quais teoricamente são iguais.

Portanto as deformações podem ser escritas:

$$\epsilon_{p'} = \frac{1}{K_1} \frac{U_1}{U_0} \quad (3.26)$$

$$\epsilon_{q'} = \frac{1}{K_2} \frac{U_2}{U_0} \quad (3.27)$$

Substituindo-se as expressões (3.26) e (3.27) nas equações (3.24) e (3.25), tem-se os momentos fletores determinados em

função das tensões elétricas medidas para cada plano.

$$M_{ix} = \frac{W_i E}{K_{i1} U_0} U_{i1} \text{ sen } x + \frac{W_i E}{K_{i2} U_0} U_{i2} \text{ cos } x \quad (3.28)$$

$$M_{iz} = \frac{W_i E}{K_{i1} U_0} U_{i1} \text{ cos } x - \frac{W_i E}{K_{i2} U_0} U_{i2} \text{ sen } x \quad (3.29)$$

onde  $i = A, B, C, D, E$  e  $F$ .

Pela substituição das equações (3.28) e (3.29) nas expressões (3.16) a (3.21), tem-se as componentes das forças em função das tensões elétricas medidas.

Para se efetuar as operações em cada uma das expressões acima, utiliza-se um computador analógico, onde os valores constantes entram como parâmetros, restando as multiplicações das tensões de medida pelo seno e cosseno do ângulo de rotação do eixo. É possível também através do computador analógico o cálculo de  $Y_1/Q_1$ ,  $Y_2/Q_2$ ,  $Y_1 + Y_2$  e outras grandezas de interesse. A figura 3.35 mostra o rodeiro instrumentado com equipamento complementar.

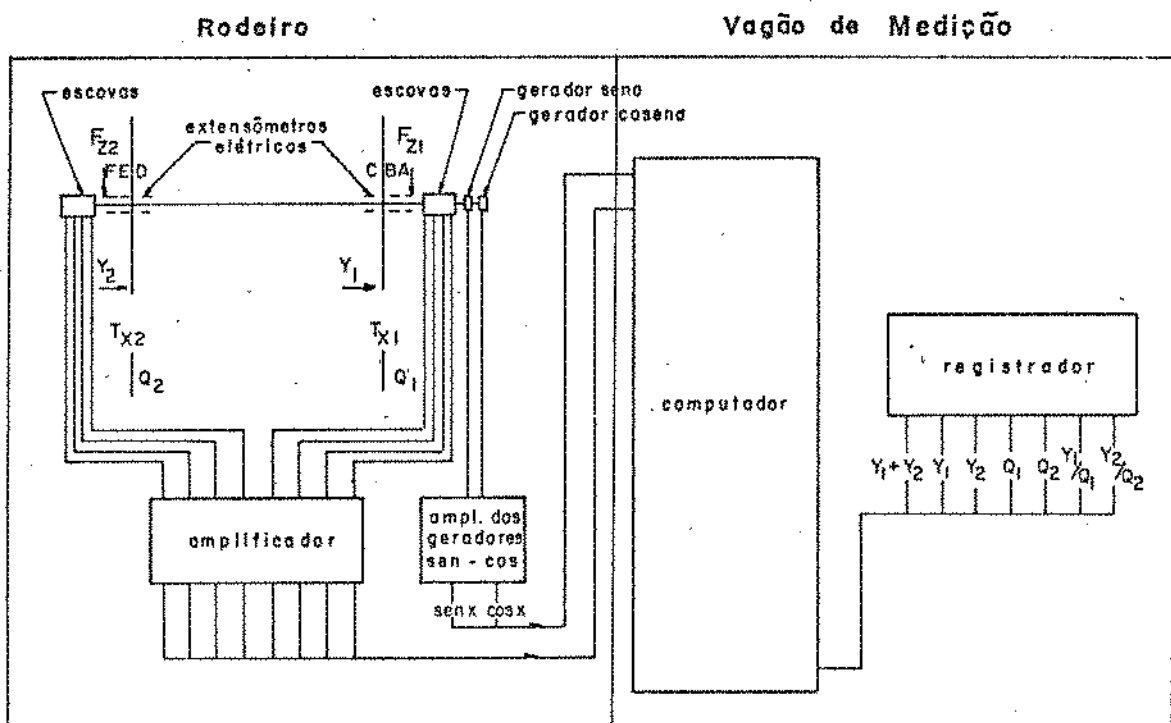


Figura 3.35 - Diagrama em bloco indicativo do rodeiro instrumentado e sua instrumentação complementar.

Os sinais gerados pelos extensômetros, devido as deformações do eixo, variam de  $0 \text{ a } \pm 5 \text{ mV}$ . Como estes sinais devem ser transportados para o computador analógico localizado no carro de medições, há necessidade de utilizar escovas (Fig. 3.36). Por outro lado, as próprias escovas introduzem no sinal de medição ruídos indesejáveis, da mesma ordem de grandeza daqueles acima mencionados. Para se evitar tal problema utilizam-se pré-amplificadores com fator de amplificação da ordem de 1000 vezes, localizados no eixo do rodeiro. Com esse procedimento os ruídos introduzidos pelas escovas, passam a ser desprezíveis.

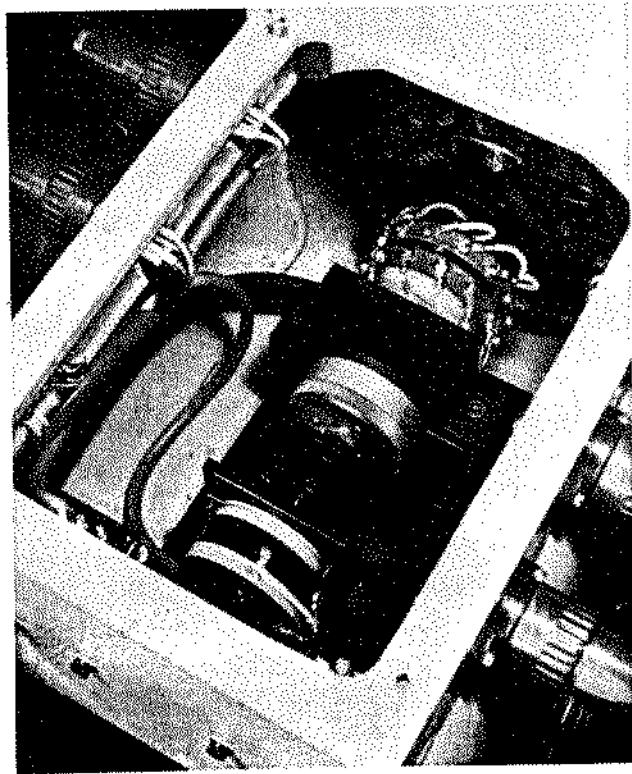


Figura 3.36 - Indicação das escovas e geradores de seno e cosseno.

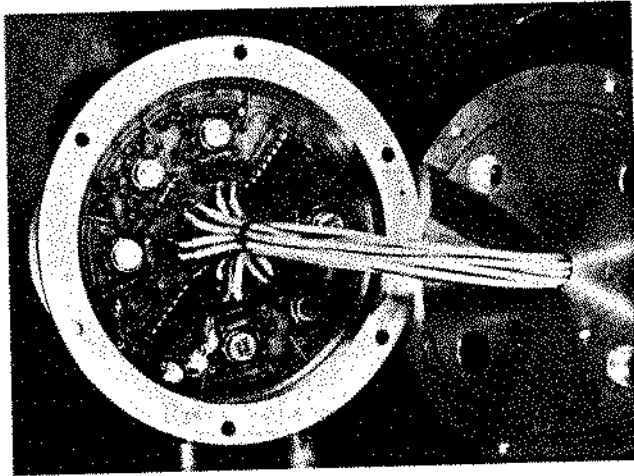


Figura 3.37 - Prê-amplificadores utilizados nos eixos.

As expressões das forças envolvem também o seno e cosseno do ângulo de rotação. Desta forma há necessidade de geradores de seno e cosseno baseado no ângulo de rotação do eixo; isto é, gerador de função da posição do eixo (Figs. 3.36 e 3.38).

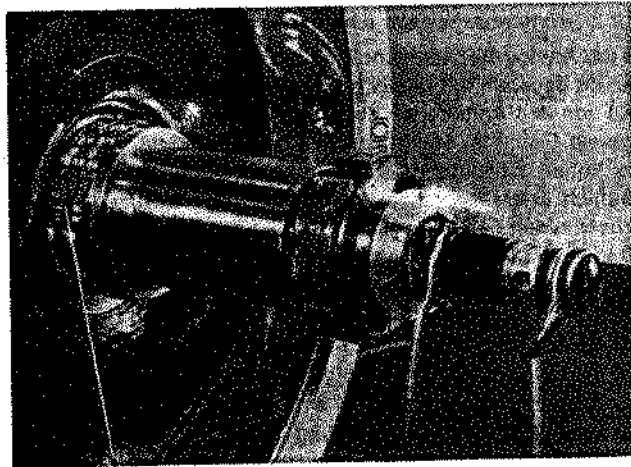


Figura 3.38 - Ponta do eixo com indicação do plano de medição e geradores de seno e cosseno.

Para esta finalidade utilizam-se geradores potenciométricos de resistência, os quais apresentam erro relativo máximo da ordem de 1,5%, o que não acontece com os geradores indutivos que podem chegar a erros de 20% (Fig. 3.39).

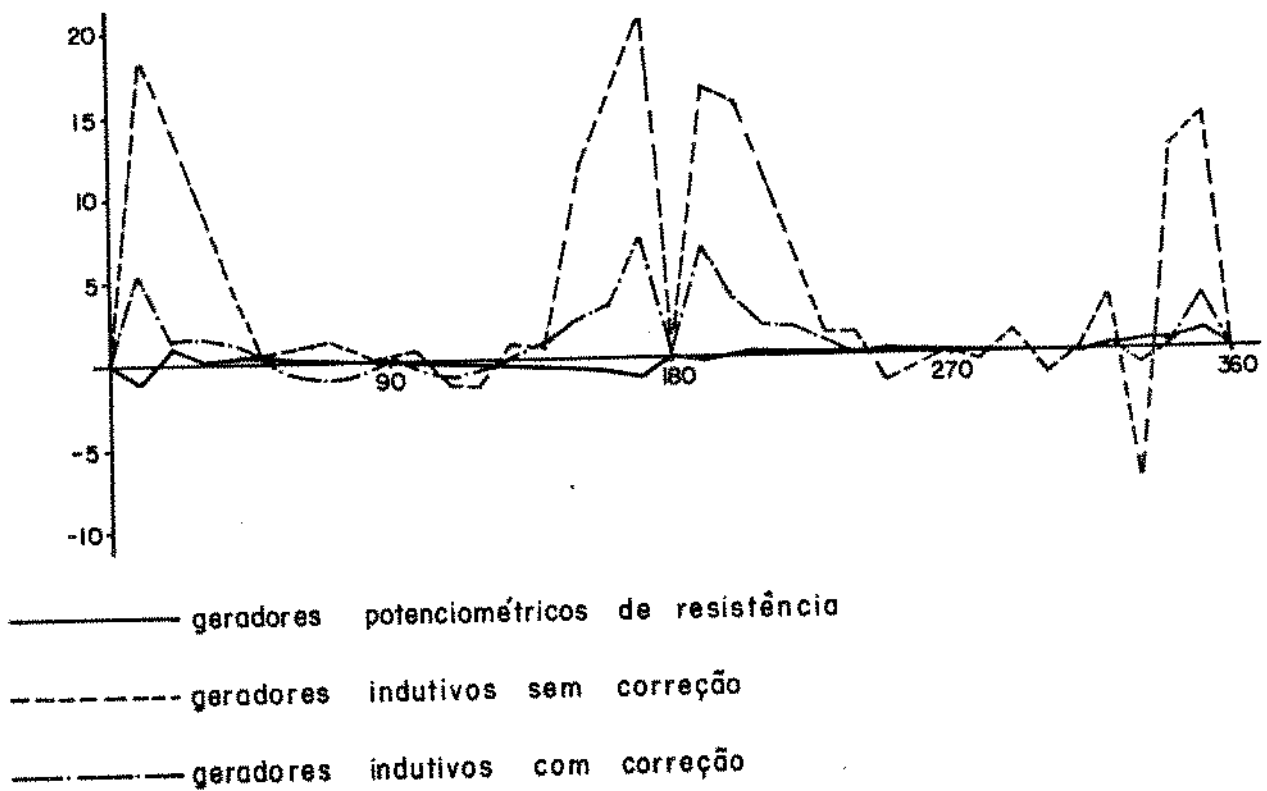


Figura 3.39 - Curvas de erros para vários tipos de geradores.

### 3.4.3 - Considerações sobre calibração do rodeiro instrumentado

Após a preparação do rodeiro instrumentado, há a necessidade de se efetuar a calibração estática e dinâmica do mesmo.

#### 3.4.3.1 - Calibração estática

A calibração estática é efetuada em duas etapas. Na primeira efetua-se a chamada pré-calibração, onde são determinados os valores reais das expressões  $\frac{WE}{K}$ , para cada eixo dos planos de medição. Existe sempre um desvio das grandezas W, E e K principalmente esta última, devido a colagem do extensômetro.

Para se efetuar a pré-calibração, o rodeiro é colocado sobre dois cavaletes, conforme figura 3.40. Em quatro posições angulares  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$  e  $270^{\circ}$  (eixos  $x'$  e  $y'$ ) são aplicadas, atra-

vês de macacos hidráulicos e dinamômetros, cargas conhecidas  $F_{1K}$ ,  $F_{2K}$  e  $F_{3K}$  separadamente nos pontos  $\bar{A}_1$ ,  $\bar{A}_2$ ,  $\bar{A}_3$ ,  $\bar{A}_4$ , nas posições indicadas na figura 3.41.

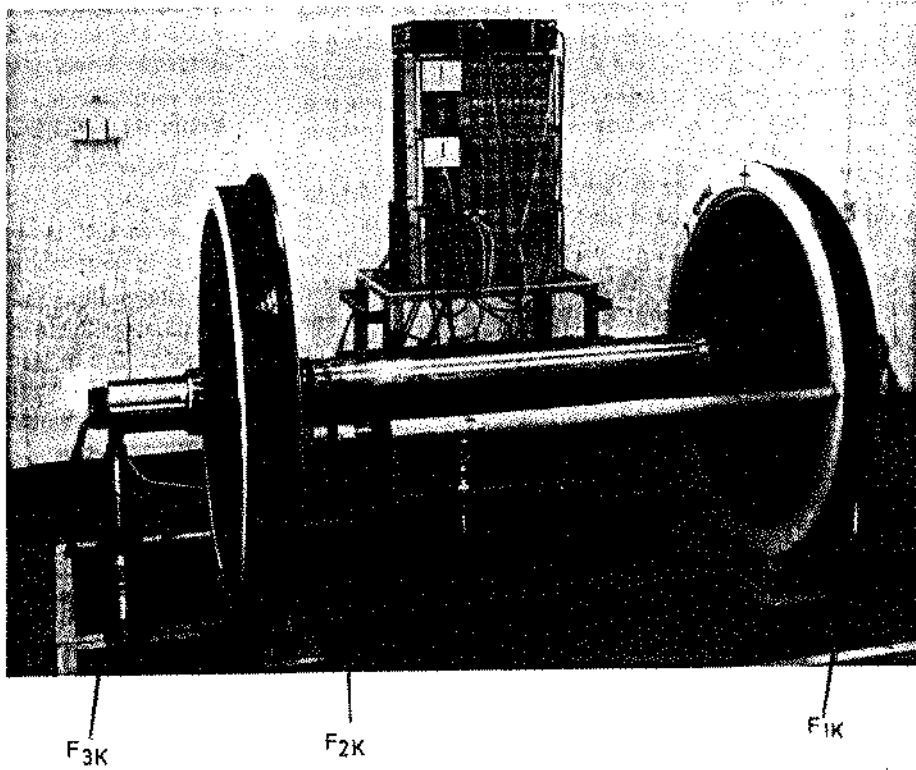


Figura 3.40 - Rodeiro montado sobre roletes a fim de efetuar a pré-calibração.

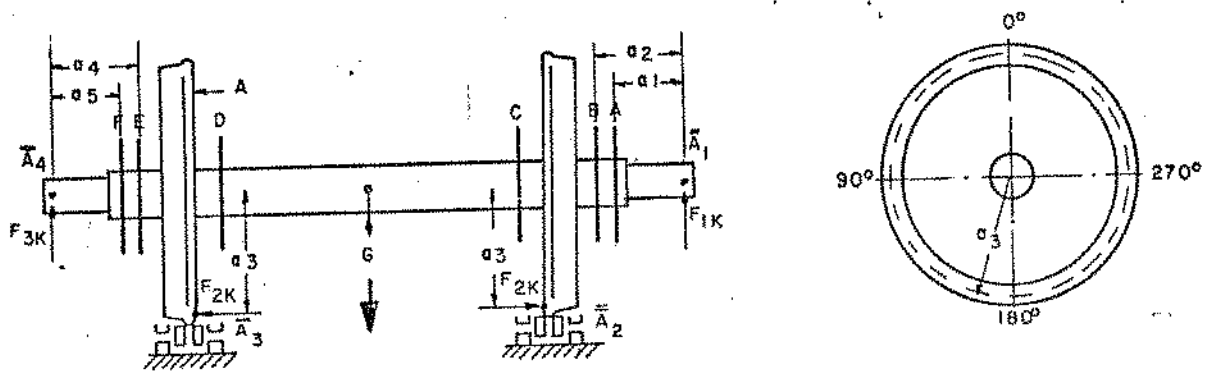


Figura 3.41 - Esquema da aplicação das forças necessárias a pré-calibração.

A força  $F_{1K}$  é utilizada para a calibração nos planos A e B,  $F_{3K}$  para os planos E e F e a força  $F_{2K}$  para os planos C e D. Através da aplicação dessas cargas, calculam-se os valores de  $\frac{WE}{K}$  para cada plano de medição nas direções  $x'$  e  $z'$ , como indicam as expressões abaixo:

$$\frac{W_A^E}{K_A} x', z' = \frac{F_{1K} a_1 U_0}{U_A} x', z' \quad (3.37)$$

$$\frac{W_B^E}{K_B} x', z' = \frac{F_{1K} a_2 U_0}{U_B} x', z' \quad (3.28)$$

$$\frac{W_C^E}{K_C} x', z' = \frac{F_{3K} a_3 U_0}{U_C} x', z' \quad (3.29)$$

$$\frac{W_C^E}{W_D} x', z' = \frac{F_{3K} a_3 U_0}{U_D} x', z' \quad (3.40)$$

$$\frac{W_E^E}{K_E} x', z' = \frac{F_{3K} a_4 U_0}{U_E} x', z' \quad (3.41)$$

$$\frac{W_F^E}{K_F} x', z' = \frac{F_{3K} a_3 U_0}{U_F} x', z' \quad (3.42)$$

Tecnicamente o rodeiro estaria calibrado. A segunda fase de calibração estática consiste na comparação das forças calculadas com os parâmetros obtidos pelas equações (3.7) a (3.42) com as forças lidas em dinamômetros padrões, como indicam as figuras 3.41 e 3.42.

O banco de ensaio, para se efetuar esta segunda etapa de calibração, é constituída de dois dinamômetros padrões (tridimensionais). O rodeiro é montado num veículo e de forma estaciona



ria registram-se as forças geradas pelo rodeiro e as provenientes do banco de ensaio. Os dois registros devem coincidir, caso contrário são ajustados fatores no computador analógico, até um afinamento entre os registros.

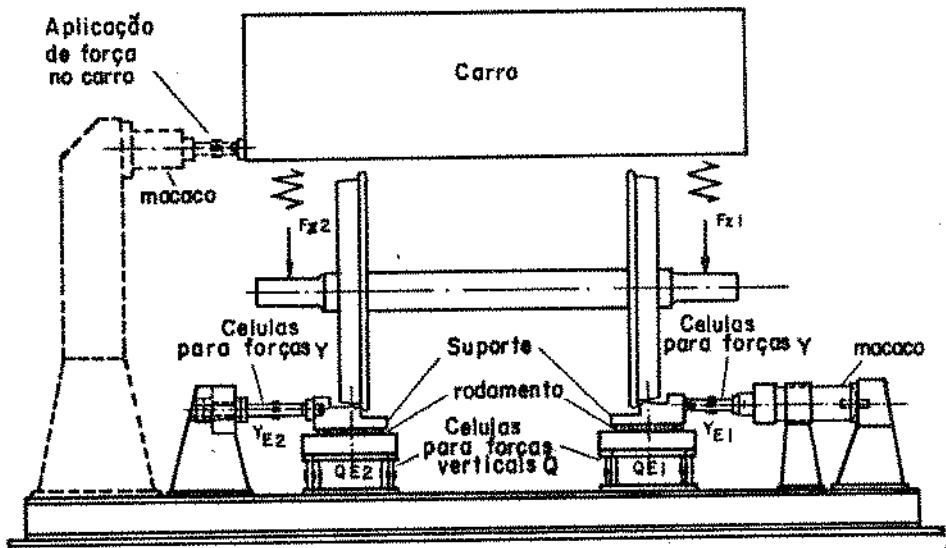


Figura 3.42 - Esquema do banco de calibração.

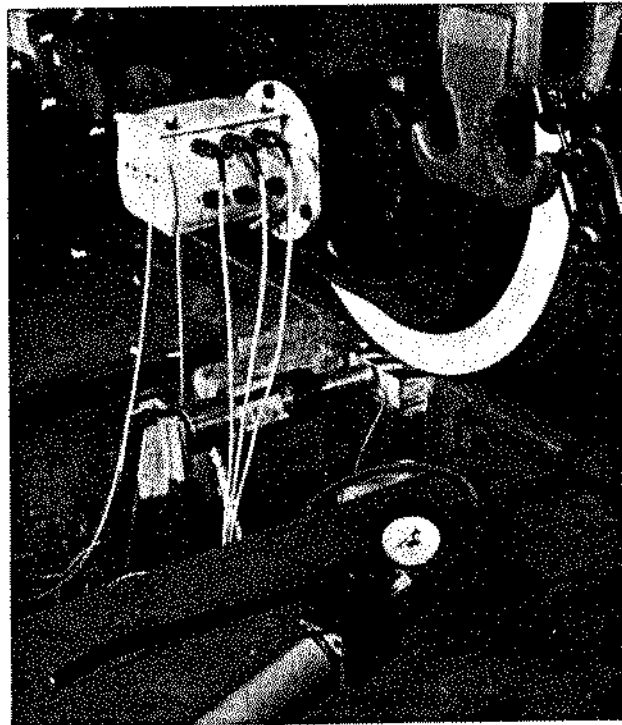


Figura 3.43 - Vista do veículo no banco de calibração.

### 3.4.3.2 - Calibração dinâmica

Devido o parecimento das forças de inércia, o rodeiro deve ser calibrado dinamicamente, através da introdução das componentes roda/trilho por atuadores hidráulicos. Estas forças introduzidas são de forma senoidal com frequência variável. Paralelamente são registradas as medições fornecidas pelo rodeiro instrumentado; isto é, determina-se a resposta em frequência. Para o nosso rodeiro, até a frequência de 40 Hz, o erro introduzido máximo nas medições é menor que 2%. Este limite de frequência é suficiente para as medições a serem efetuadas, de acordo com experiências da Deutsche Bundesbahn.

## CAPÍTULO 4

### VIAGENS DE MEDIÇÃO

A composição para efetuar as medições compõe-se de uma locomotiva diesel-elétrica, carro auxiliar, carro de medição e dois vagões de minérios - "Vagão Gondola Unidade Dual" (Fig. 4.1). Os truques dos vagões de minério foram todos do mesmo tipo para as viagens de teste.



Figura 4.1 - Foto da composição de medição.

A composição foi preparada na oficina da Rede Ferroviária Federal na cidade de Três Rios. Esta preparação compreendeu a colocação dos equipamentos no carro de medição, colocação do truque instrumentado, cabeção, etc. (Fig. 4.2 e 4.3).

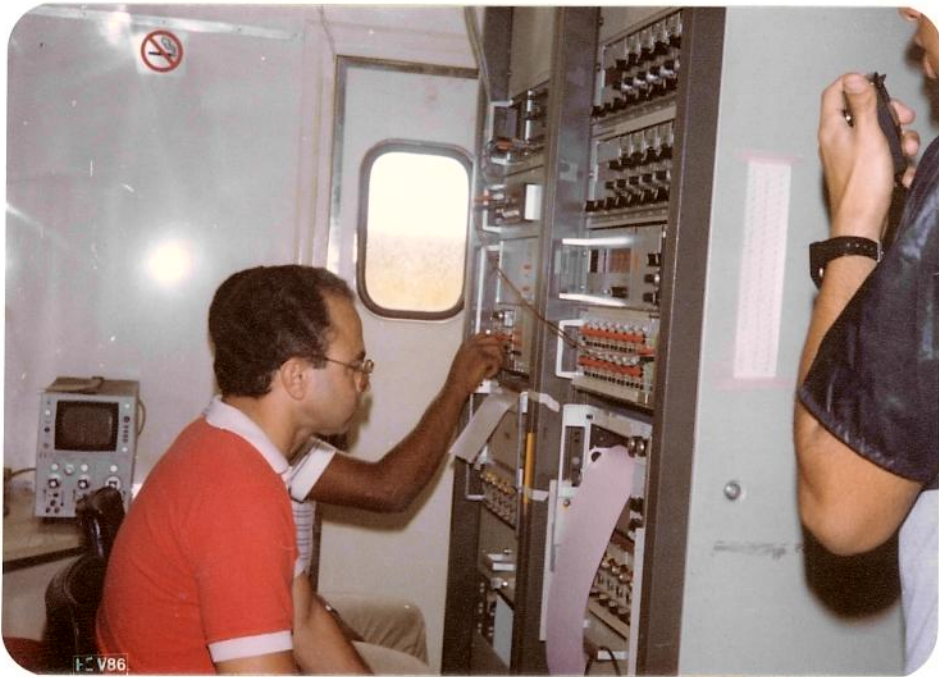


Figura 4.2 - Vista interna do carro de medição mostrando o armário de instrumentos.

Os cabos de medição que partiam do truque, tanto dos extensômetros como dos capataadores, terminavam em um armário de ligações atrás do vagão de minério (Fig. 4.3). Deste armário outros cabos davam a continuidade dos sinais para o carro de medição. Este dispositivo intermediário possibilitava a comutação dos pontos de medições desejados para o registro na fita magnética, a qual permitia a gravação de 14 sinais simultâneos. (Fig. 4.4)



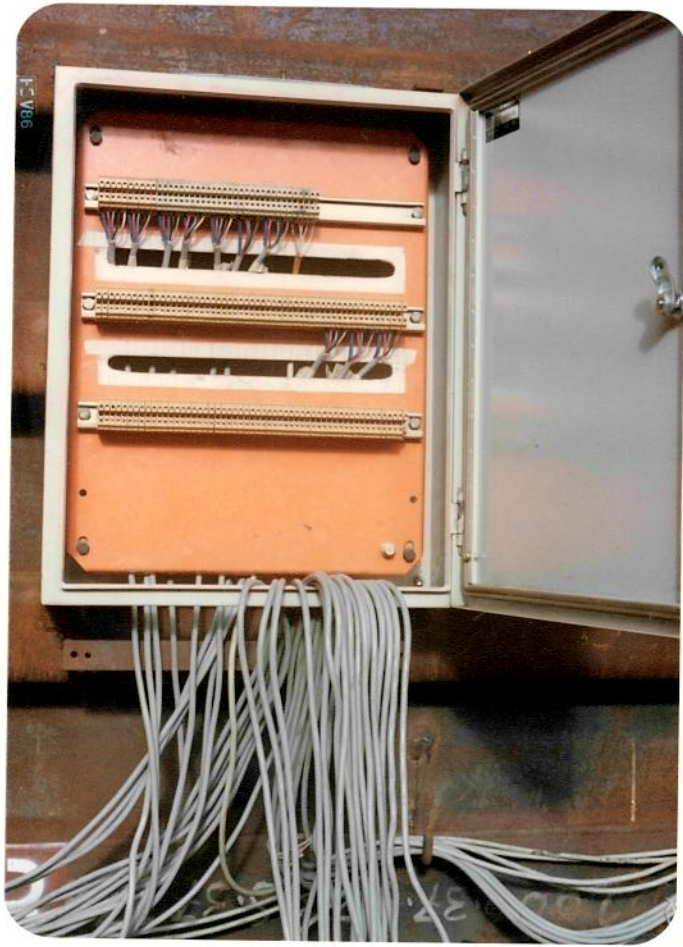


Figura 4.3 - Sistema de ligação dos cabos.

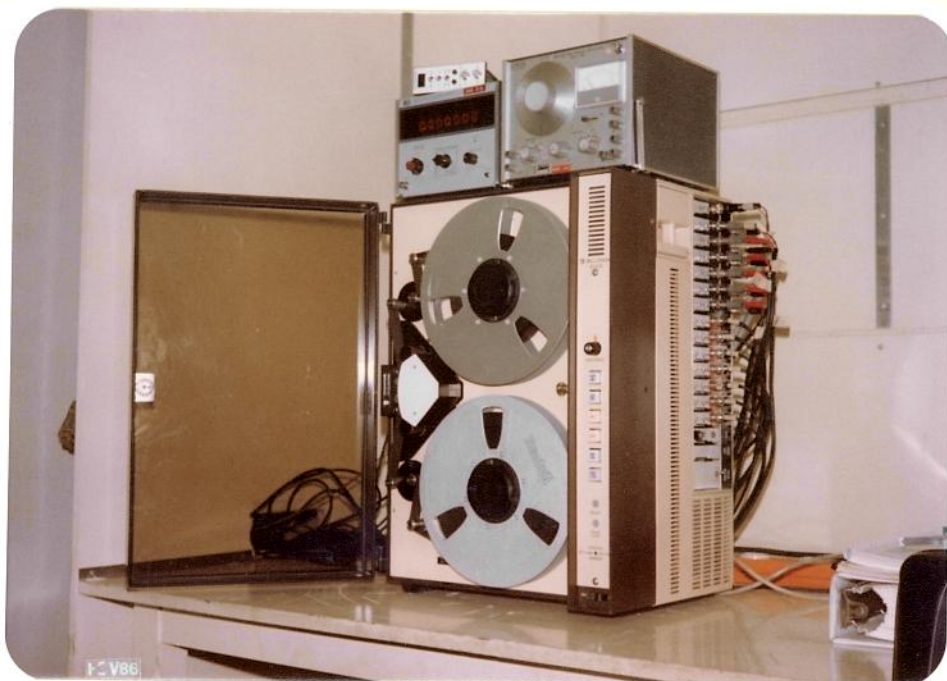


Figura 4.4 - Vista do registrador de fita magnética.

Os sinais dos extensômetros e captadores eram conectados nos amplificadores Hottinger, seguindo para filtros de frequência passa-baixa, registrador de fita magnética e registrador de papel fotossensível. Os sinais das forças, recebidos pelo rodeiro instrumentado, seguiam para o computador, para filtros e finalmente para o registrador de fita magnética e de papel fotossensível.

As viagens de medição foram realizadas com os vagões de minérios vazios, como também carregados. Foram utilizadas duas configurações básicas da composição, a saber: configuração U, onde o rodeiro instrumentado se localizava na cauda da composição e a configuração P, onde o mesmo encontrava-se na cabeça da composição. (Fig. 4.5).

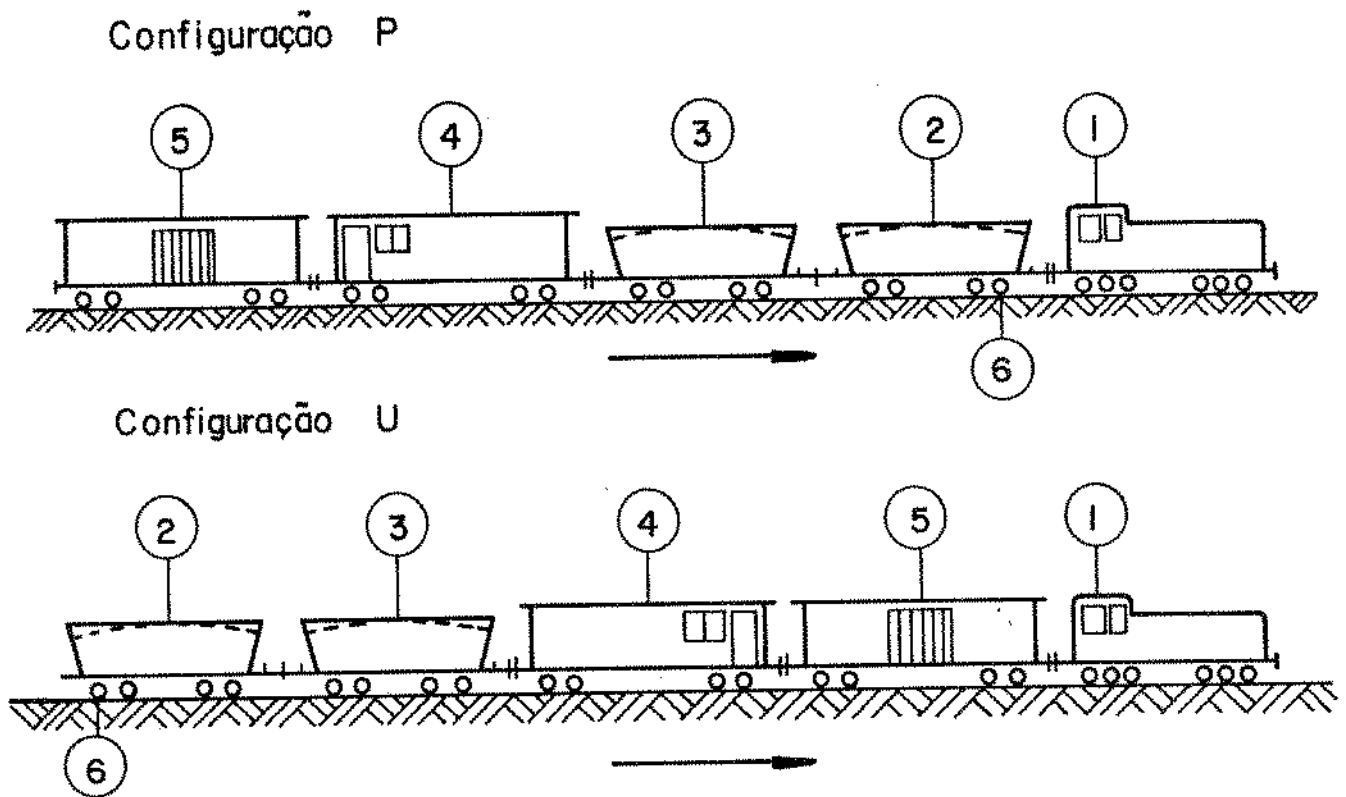


Figura 4.5 - Composição de medição: 1 - locomotiva; 2 e 3 vagões de minério acoplados; 4 - carro com equipamento de medição e serviços auxiliares; 5 - vagão com equipamento auxiliar (grupo gerador, ferramentas e materiais diversos); 6 - rodeiro instrumentado.

Realizaram-se testes nas duas configurações, pois o comportamento do rodeiro em cada uma delas é diferente. O rodeiro na configuração P é um rodeiro guia, enquanto que na configuração U o mesmo é livre, podendo oscilar mais facilmente na direção lateral.

Após a realização das viagens com os vagões vazios, os mesmos foram carregados com minério de modo homogêneo, de tal maneira que cada roda suportasse uma carga de 15 ton. Isto corresponde a capacidade bruta nominal do vagão de 120 ton. (Fig. 4.6).

Esta carga foi controlada no carregamento, através de células de carga e pelo próprio rodeiro instrumentado.



Figura 4.6 - Carregamento dos vagões com minério através de escavadeira.

As viagens com o truque FNV foram efetuadas com duas variantes, uma com C-PEP e outra sem C-PEP (ver item 3.1). O truque COBRASMA apenas trafegou com o sistema de ampara-balanço de apoio constante (ver item 3.1). O truque LHB só apresentava uma variante.



As viagens se processaram com as rodas de perfil AAR-M 107, banda de rolamento cônica 1/20. Apenas o truque LHB também viajou com banda de rolamento ORE-S 1002.

Nos trechos escolhidos para as medições, próximo à Três Rios e Barra do Piraí (ver capítulo 2), a composição viajou em velocidades constantes de 40 km/h a 90 km/h em vazio e de 40 km/h a 70 km/h carregado, nas configurações U e P, bem como para as diversas variantes de truques.

O quadro abaixo mostra resumidamente a quantidade de viagens realizadas.

Tabela 4.1 - Número de viagens realizadas nos ensaios de campo sob diversas condições

| FIRMAS<br>CONDIÇÕES                       | COBRASMA | FNV | LHB |
|---|----------|-----|-----|
| Viagens com vagões de minérios vazios     | 38       | 66  | 38  |
| Viagens com vagões de minérios carregados | 73       | 68  | 71  |

## CAPÍTULO 5

### PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DOS TRUQUES

#### 5.1.- Considerações Gerais

Para a avaliação de truques ferroviários, devem ser considerados vários fatores, tais como: economia, conforto, segurança de tráfego e desgaste, principalmente entre roda e trilho. Será abordado neste trabalho apenas o fator relativo a segurança de tráfego e comportamento dinâmico. O fator conforto é analisado apenas para vagões de passageiros e vagões de transporte de certos tipos de materiais, que se danificam durante a viagem, o que não é o caso do transporte de vagões de minério de ferro. O fator econômico está relacionado com as possibilidades da ferrovia, fator este aqui também não analisado. O fator desgaste requer um processo bastante longo de análise, necessitando-se vários anos de pesquisa na ferrovia. Como não se dispunha de tempo suficiente de pesquisas na via e também uma vez que a Estrada de Ferro Carajás nesta época não estava totalmente construída, não dispo<sup>ndo</sup> assim de viagens normais de minério, este fator desgaste também não foi considerado. Convém salientar que está em desenvolvimento na Alemanha um método de avaliação do desgaste realizado em tempo relativamente curto com o auxílio de isótopo radioativo, mas infelizmente o Brasil ainda não dispõe de tal tecnologia.

O comportamento de truques ferroviários depende basicamente do seu sistema dinâmico, ou seja da sua função de transferência  $F(s)$ , cuja resposta  $Y(s)$  está relacionada com a excitação exercida pela via, através dos trilhos, isto é, da função  $X(s)$ . (Fig. 5.1).

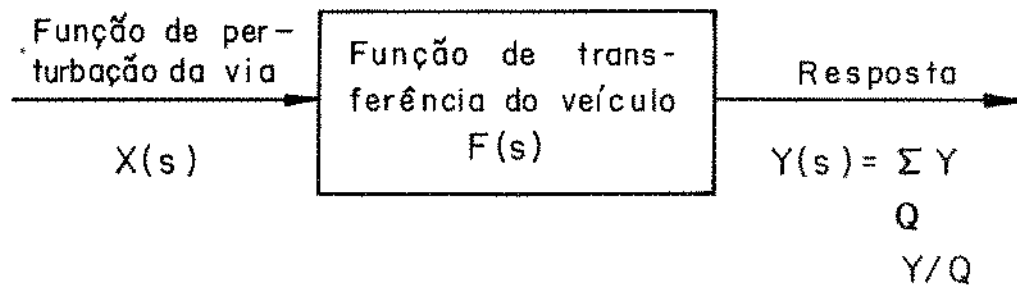


Figura 5.1 - Diagrama em bloco de um veículo para estudo de seu comportamento.

A função de perturbação pode ser:

- de longo comprimento de onda, com a qual o veículo reage com oscilações de baixa frequência.

- de curto comprimento de onda, com a qual o veículo reage com oscilações de alta frequência, ou mesmo na ressonância.

A função de perturbação da via pode variar com o tempo e deve ser corrigida periodicamente pela manutenção de rotina da ferrovia. Por outro lado, o modelo dinâmico do veículo deve ser projetado para garantir continuidade e segurança de operação.

No enfoque teórico do problema, a equação do movimento de um veículo é uma equação diferencial matricial da forma indicada na expressão (5.1).

$$\overline{M}\ddot{Z} + \overline{C}\dot{Z} + \overline{K}Z = X \quad (5.1)$$

Onde:  $\overline{M}$  = matriz de massa

$\overline{C}$  = matriz de amortecimento

$\overline{K}$  = matriz de rigidez

$Z$  = vetor deslocamento

$X$  = vetor de excitação

A excitação  $X$  pode ser decomposta em duas componentes, uma função do vetor deslocamento, que provém da geometria do contato roda e trilho [8] e outra função das perturbações da via, isto é:

$$X = X_1 + X_2, \quad (5.2)$$

Onde:

$$X_1 = F_1 \dot{Z} + F_2 Z, \quad [8]$$

$X_2 =$  função de perturbação da via

Substituindo-se (5.2) em (5.1) chega-se à equação (5.3)

$$\bar{M} \ddot{Z} + (\bar{C} - F_1) \dot{Z} + (\bar{K} - F_2)Z = X_2 \quad (5.3)$$

A solução da equação homogênea leva a análise do comportamento próprio do veículo, mostrando os modos naturais de vibração, como também o efeito da auto-excitação, enquanto que a solução particular define o comportamento à perturbação [9], [10], [11].

São de grande interesse o comportamento vertical e o lateral, os quais têm fundamentos bastante diversos [12]. O comportamento lateral apresenta o fenômeno de auto-excitação, proveniente da geometria de contato entre roda e trilho [8]; já o comportamento vertical não apresenta este fenômeno.

Na avaliação da qualidade do veículo, bem como da via permanente, as forças entre roda e trilho têm seu papel principal. Importante também na dinâmica do veículo é o seu truque, o qual liga a estrutura do vagão à via. O comportamento do veículo deve ser analisado para vários trechos típicos de via, como retas, curvas, aparelhos de mudança de via e em condições de erros de geometria diversos.

O objetivo do presente trabalho é a comparação de três tipos de truques fornecidos pela Companhia Vale do Rio Doce, através da análise das medições das forças entre roda e trilho. Para

tanto, serão analisados os seguintes fatores:

- Comportamento lateral.
- Comportamento vertical.
- Segurança contra o descarrilhamento - Critério do valor limite do fator  $Y/Q$ .
- Segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura - Critério Prud'Homme.

Outro fator muito importante é a observação visual durante as viagens de medição. Neste sentido adquirimos uma experiência, acompanhando várias viagens de medição, durante um estágio de 6 meses na Deutsche Bundesbahn - Alemanha. Esta observação de conjunto (componentes do truque e caixa do vagão) auxilia a realização de estudos de melhoria do projeto.

## 5.2 - Comportamento lateral

Para a análise do comportamento lateral devem ser abordados o movimento de auto-excitação o qual define a estabilidade lateral do truque e também o movimento proveniente da própria perturbação da via. Para esta análise são utilizadas as forças de guia assim como sua somatória.

### 5.2.1 - Movimento de auto-excitação de um rodeiro

O movimento de auto-excitação é observado mais facilmente através de um trecho em reta de via.

Através de estudos teóricos realizados [11], [12] e [13], a solução da equação diferencial do movimento lateral de um rodeiro em velocidade constante, suspenso por molas e amortecedores (Fig. 5.2); apresenta três casos típicos, quando o sistema recebe um impulso.

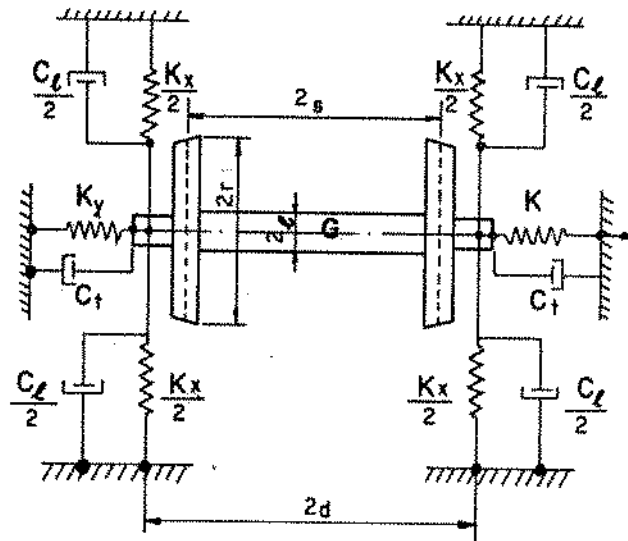


Figura 5.2 - Rodeiro suspenso por molas e amortecedores

a) Comportamento Estável

Inicia-se um movimento oscilatório o qual tende a zero (Fig. 5.3) no decorrer do tempo. A velocidade do rodeiro é denominada *sub-crítica* e o movimento é estável.

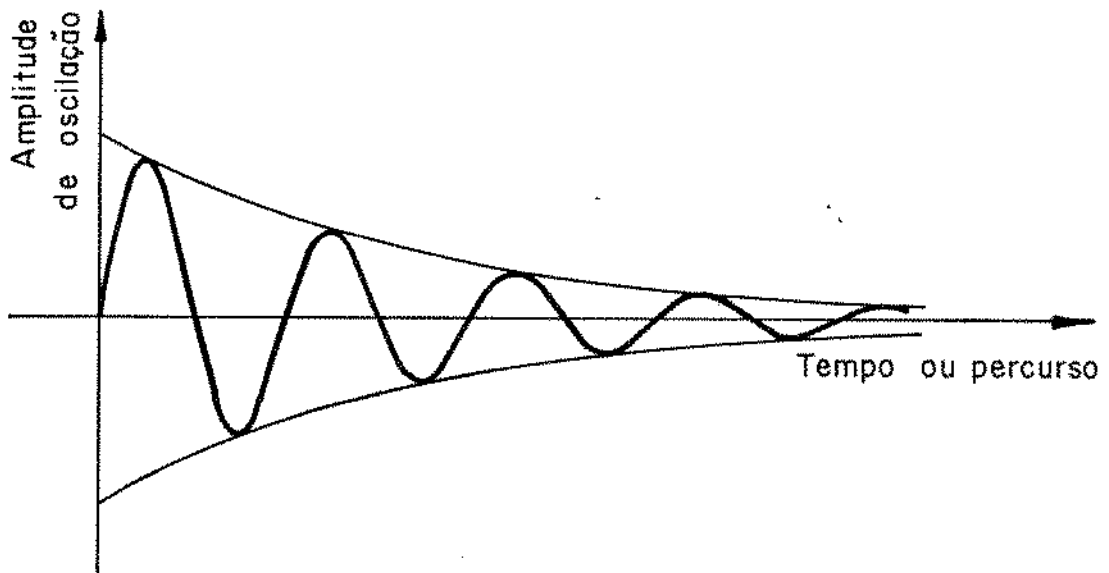


Figura 5.3 - Comportamento lateral estável.

b) Comportamento Cíclico

Inicia-se um movimento oscilatório no qual as amplitudes diminuem, tendem a um movimento senoidal, através do tempo. (Fig. 5.4). A velocidade do rodeiro é dita *crítica* e o movimento é estável e cíclico.

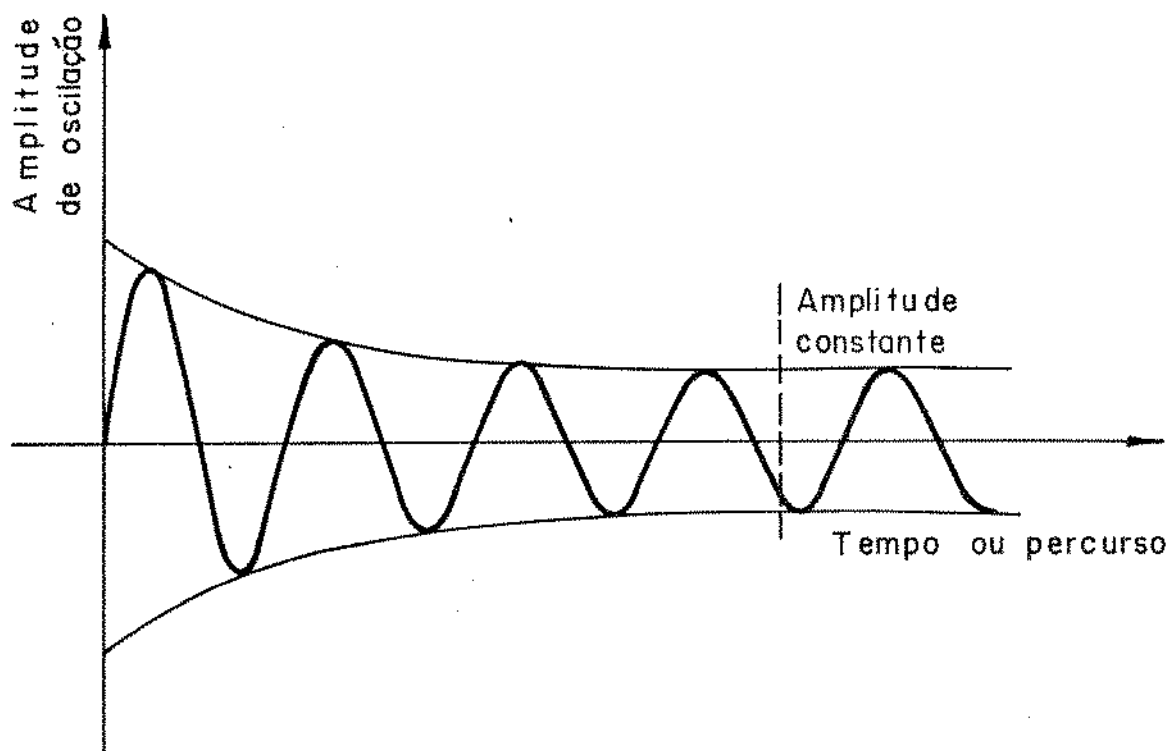


Figura 5.4 - Comportamento lateral estável e cíclico.

c) Comportamento Instável

Inicia-se um movimento oscilatório de amplitudes crescentes, que provocará finalmente o choque do friso da roda com o trilho, ocasionando o movimento de "zig-zag" do rodeiro (Fig.5.5). A velocidade do rodeiro é denominada de *super-crítica* e o movimento é instável.

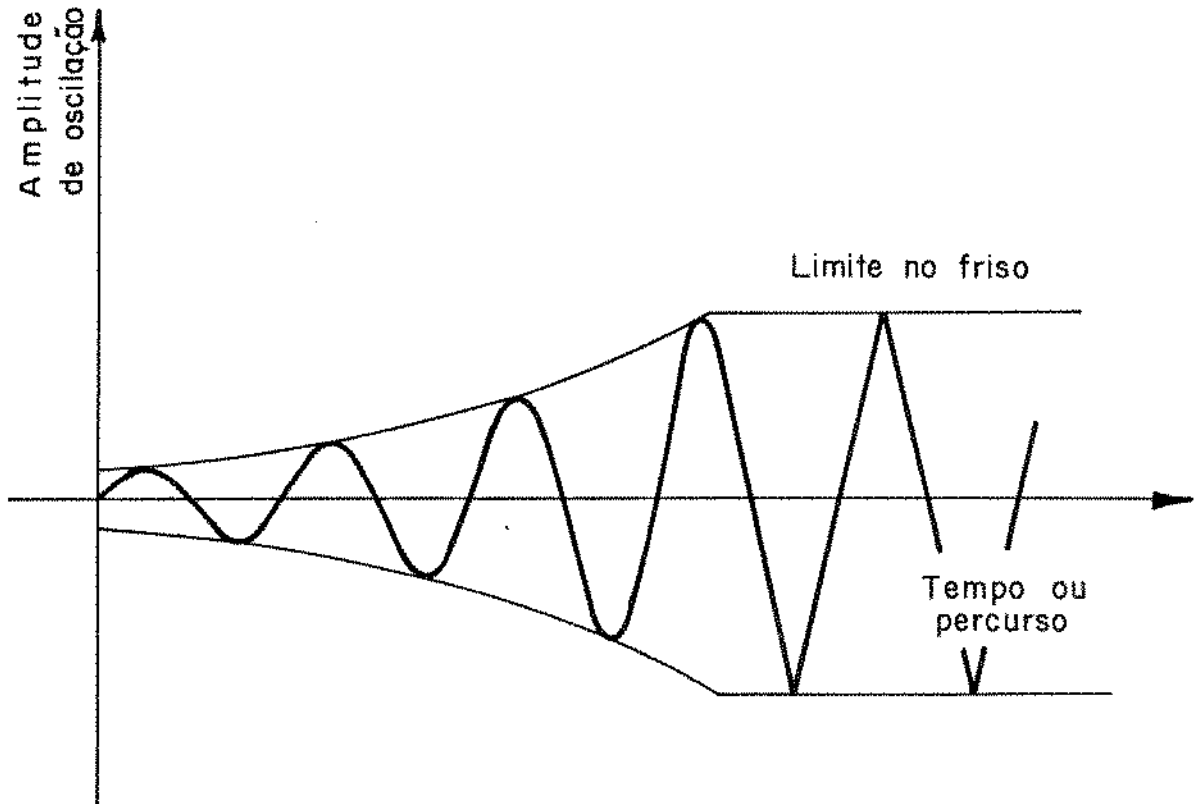


Figura 5.5 - Comportamento lateral instável.

### 5.2.2 - Considerações sobre o perfil cônico da roda

O estudo cinemático do movimento de rolamento de um ro-deiro livre com rodas de perfil cônico, efetuado pela primeira vez por Klingel [14], [15] e [16], mostra que o mesmo descreve um movimento senoidal na via com comprimento de onda  $L_1$  (Fig. 5.6), dado pela expressão:

$$L_1 = 2\pi \sqrt{\frac{r_0 s}{t_g \gamma}} \quad (5.4)$$

Onde:  $r_0$  = raio de rolamento

$2s$  = distância dos pontos de contato

$\gamma$  = ângulo de inclinação do perfil cônico da banda de rolamento.



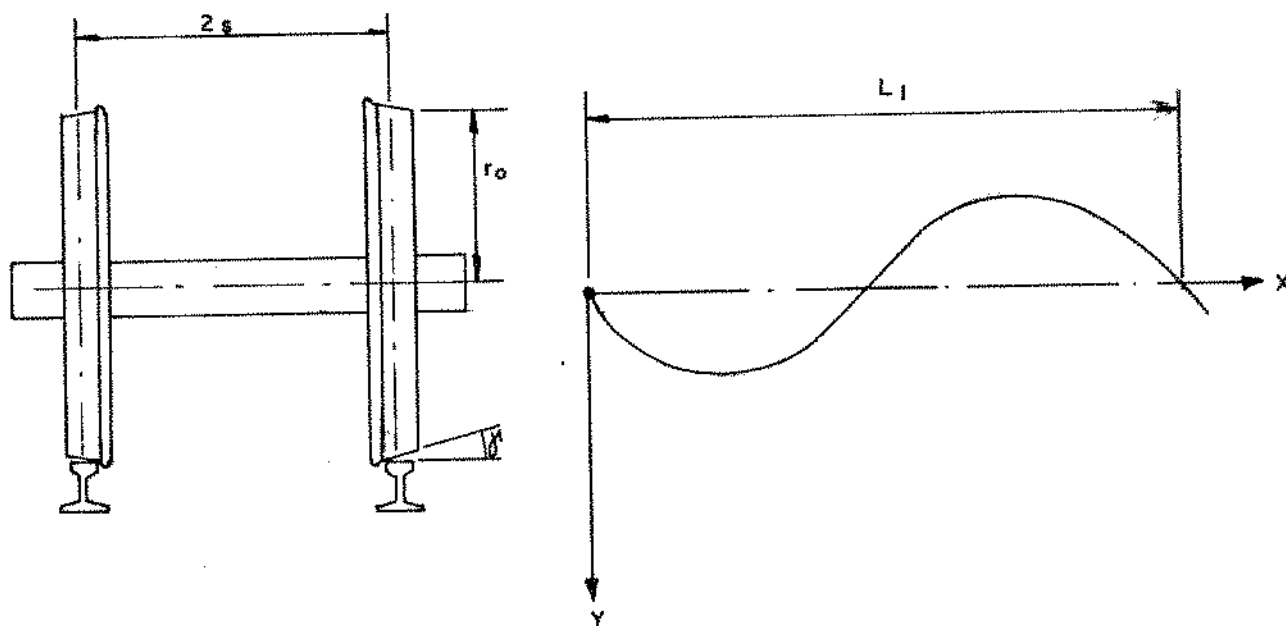


Figura 5.6- Movimento senoidal de um rodeiro na via.

Como se pode observar, esse comprimento de onda  $L_1$  não é função da velocidade do rodeiro, mas sim apenas de parâmetros geométricos. Por outro lado, se a velocidade de translação do rodeiro é  $V$ , a frequência do movimento senoidal é dado por:

$$f = \frac{V}{2\pi} \sqrt{\frac{t_g \gamma}{r_0 s}} \quad (5.5)$$

Para o caso em que o perfil da roda não é cônico, mas sim uma outra superfície genérica como o perfil ORE S 1002, o estudo é não linear e para a linearização pode-se usar aproximadamente as fórmulas (5.4) e (5.5), onde o ângulo  $\gamma$  é adotado como ângulo da tangente no ponto de contato, ângulo este chamado de conicidade equivalente. [17]

Caso semelhante, ocorre com o perfil cônico, quando se tem bitola encurtada, pois o contato se dá no raio de concordância do friso, o qual não é cônico.

Outro caso a considerar é o valor do comprimento de onda, para um truque de estrutura rígida com os rodeiros rigidamente a ela interligados. Neste caso, o comprimento do onda pode ser calculado pelas fórmulas (5.6) e (5.7), para o truque com dois eixos e três respectivamente [18] e [19].

$$L_2 = L_1 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{s}\right)^2} \quad (5.6)$$

$$L_2 = L_1 \sqrt{1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a}{s}\right)^2} \quad (5.7)$$

Onde  $a$  é a metade da distância entre eixos do truque.

Caso os truques COBRASMA e FNV fossem constituídos de tal modo que, as laterais e a travessa formassem uma única estrutura e ainda as caixas dos rodeiros fossem rigidamente fixadas na lateral, o comprimento de onda do movimento senoidal seria 26,5 m, calculado abaixo:

$$r_0 = 482,6 \text{ mm}$$

$$2s = 1639 \text{ mm}$$

$$t_{gY} = 1/20$$

$$2a = 1828,8 \text{ mm}$$

Utilizando as equações (5.6) e (5.7) calculam-se  $L_1$  e  $L_2$ .

$$L_1 = 17,7 \text{ m} \quad (5.8)$$

$$L_2 = 26,5 \text{ m}$$

O truque LHB teoricamente tem um comportamento próprio no limite da estabilidade, apresentando movimentos laterais acentuados, mesmo em baixas velocidades. Uma vez que a constante de mola lateral é baixa, o comprimento de onda do movimento trans-

versal do rodeiro deveria ser da ordem de 17,7 m, correspondente ao movimento de um rodeiro livre na via.

Por outro lado, devido a este movimento senoidal acentuado, haverá uma utilização de grande parte do perfil da roda, o que deverá ocasionar um desgaste por igual.

### 5.3 - Comportamento vertical

Na análise do comportamento vertical utilizam-se as forças dinâmicas de apoio que surgem entre roda e trilho.

Uma vez que a carga estática de apoio é mantida constante, tendo um determinado valor com os vagões vazios e outro com vagões carregados, a análise do comportamento vertical foi elaborada somente através da componente dinâmica da força vertical, isto é, a parte estática devido ao peso próprio foi subtraída.

### 5.4 - Segurança ao descarrilhamento

#### 5.4.1 - Considerações gerais

Diversas são as causas de um descarrilhamento, como por exemplo quebras de rodas, falhas na sinalização, defeitos mecânicos, defeitos acentuados da geometria da linha, etc.

As companhias ferroviárias, têm em geral grande interesse em saber quais foram as causas reais de um descarrilhamento, para com isso tentar eliminá-las e evitar que um outro descarrilhamento possa ocorrer pelo mesmo motivo.

Sabe-se porém, por experiência, que as causas de um descarrilhamento são quase sempre diferentes e necessitam-se algumas vezes de total perspicácia da engenharia, para se fazer um bom levantamento sobre os fatos e chegar com sucesso à causa real do acidente.

Dentre as causas que provocam descarrilhamento, uma das principais é a ascensão do friso da roda sobre o trilho, ponto es

te que será abordado neste item.

#### 5.4.2 - Determinação das forças atuantes no rodeiro

Para melhor entendimento das forças entre roda e trilho, considera-se o estudo sobre uma curva.

Observando-se um veículo ferroviário numa curva a esquerda, nota-se que para um rodeiro guia, o friso da roda externa (roda guia), irá tocar contra o trilho num ângulo de ataque  $\psi$  e a roda interna (roda livre) terá o seu friso um pouco afastado do trilho, havendo uma folga entre ambos. (Fig. 5.7).

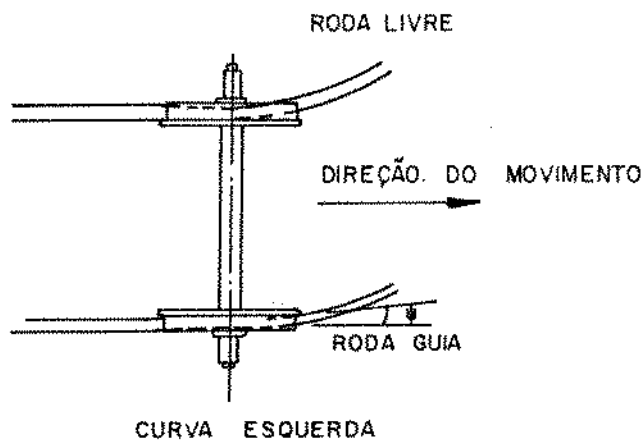


Figura 5.7 : - Posicionamento do rodeiro na entrada da curva.

Na curva, o rodeiro recebe uma aceleração  $a_h$ , na direção contrária a  $y$ . Na figura 5.8 encontram-se as forças atuantes no rodeiro.

Forças de mancal  $F_{y1}$ ,  $F_{z1}$ ,  $F_{y2}$ ,  $F_{z2}$

Forças peso  $G$

Forças de reação roda/trilho  $Y_1$ ,  $Q_1$ ,  $Y_2$ ,  $Q_2$ .

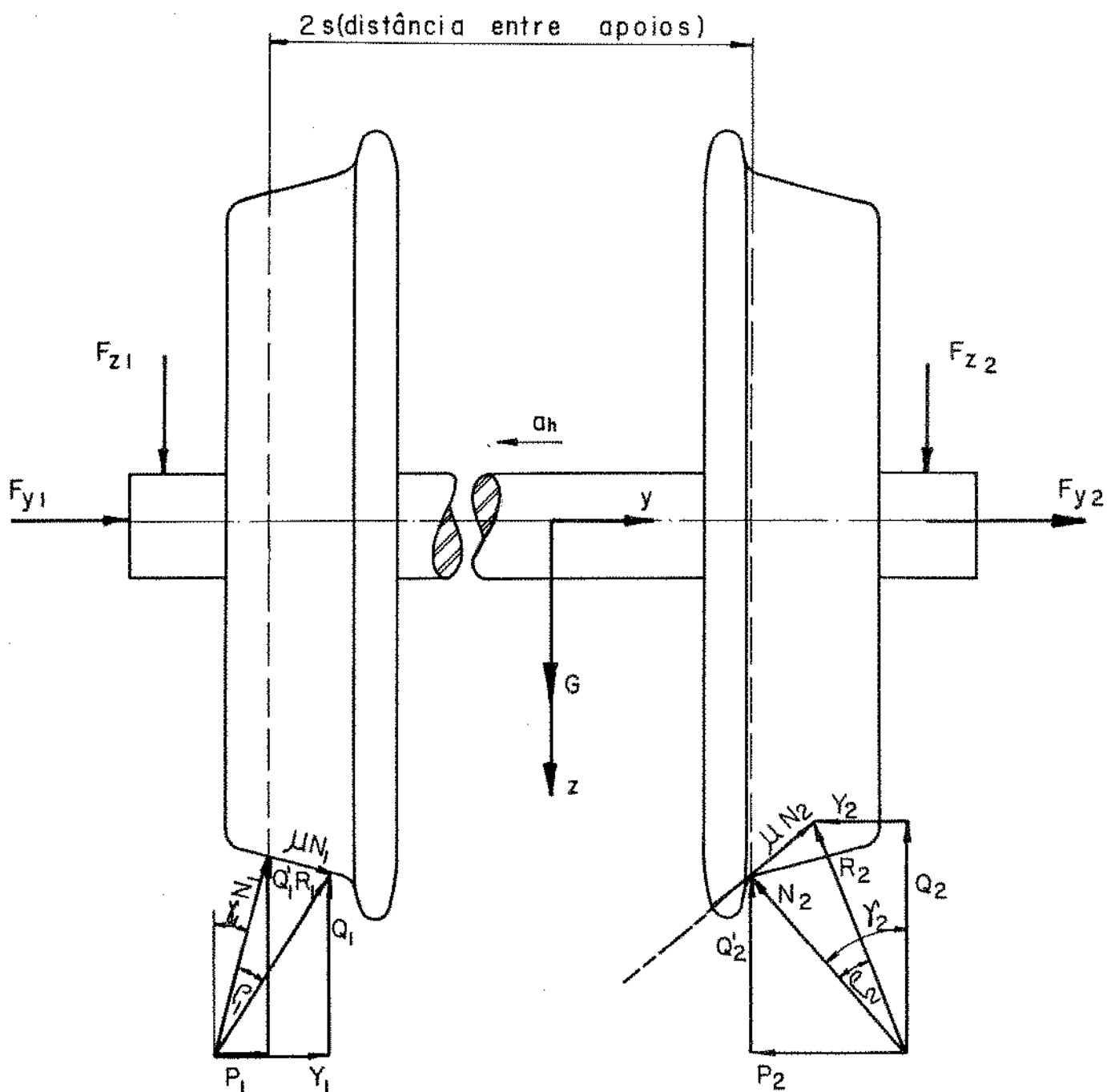


Figura 5.8 - Forças atuantes no rodeiro.

Fazendo-se agora uma análise isolada para cada uma das rodas, tem-se:

a) Roda Guia (Roda-2 Fig. 5.8)

Como já foi visto, esta roda irá tocar o trilho num ponto de seu contorno, o qual situa-se no flanco de seu friso.

As forças laterais externas provocam a subida do friso

da roda no trilho. Porém a força vertical externa  $Q_2$  está atuando contra esse efeito.

Designando-se o coeficiente de atrito por  $\mu_2$ , a força de atrito, dada por  $\mu_2 N_2$ , é dirigida para cima no ponto de contato da roda.

A resultante entre a força normal  $N_2$  e a força de atrito  $\mu_2 N_2$  será uma força oblíqua, dirigida para cima e denominada  $R_2$ , a qual tem as componentes  $Q_2$  e  $P_2$ .

A resultante  $R_2$  será agora decomposta em suas componentes transversal ou *força transversal de guia*  $Y_2$  e vertical ou *força vertical de apoio*  $Q_2$ .

Podemos observar que havendo o atrito, a componente  $Y_2$  torna-se menor que  $P_2$ , favorecendo a segurança ao descarrilhamento.

A força de guia  $Y_2$  irá atuar sempre para o *lado interno da via* a componente horizontal da força de atrito  $\mu_2 N_2$  estará sempre atuando contra ela.

O ângulo  $\gamma_2$  corresponde ao ângulo de inclinação do perfil da roda, no ponto de contato, com a vertical.

Observando-se a figura 5.8, tem-se:

$$Y_2 = N_2 \operatorname{sen} \gamma_2 - \mu_2 N_2 \operatorname{cos} \gamma_2$$

$$Q_2 = N_2 \operatorname{cos} \gamma_2 + \mu_2 N_2 \operatorname{sen} \gamma_2$$

O critério de descarrilhamento está diretamente ligado à relação entre a força lateral e vertical [13], [20], [21].

Determinando-se esta relação, tem-se:

$$\frac{Y_2}{Q_2} = \frac{\operatorname{sen} \gamma_2 - \mu_2 \operatorname{cos} \gamma_2}{\operatorname{cos} \gamma_2 + \mu_2 \operatorname{sen} \gamma_2} \quad (5.10)$$

$$\frac{Y_2}{Q_2} = \frac{t_g \gamma_2 - \mu_2}{1 + \mu_2 t_g \gamma_2}$$

O ângulo  $\rho_2$  corresponde ao ângulo de atrito, cuja sua tangente é igual ao coeficiente de atrito  $\mu_2$ .

Assim chega-se à equação:

$$\frac{Y_2}{Q_2} = \frac{t_g \gamma_2 - t_g \rho_2}{1 + t_g \rho_2 \cdot t_g \gamma_2}$$

Ou finalmente:

$$\frac{Y_2}{Q_2} = t_g (\gamma_2 - \rho_2) \quad (5.11)$$

Denominada *fator de descarrilhamento*, cujo valor depende do ângulo de contato roda/trilho e do ângulo de atrito.

#### b) Roda-Livre (Roda-1, Fig. 5.8.)

Nesta roda, o diagrama das forças atuantes fornece uma visualização um pouco diferente.

Esta roda toca o trilho numa região mais externa de sua superfície de rolamento, região esta onde o perfil da roda possui um pequeno ângulo de inclinação com a horizontal, ou seja nesta região pode-se dizer que sua superfície é aproximadamente cônica. Assim, a força normal  $N_1$ , atuante entre roda e trilho, possui um pequeno ângulo de inclinação com a vertical.

Como a orientação do rodeiro numa curva se dá através da roda-guia (Roda-2), quando esta roda tende a subir sobre o trilho, surge a força vertical atuando contra esse efeito, tendendo deslocar o rodeiro e conseqüentemente a roda livre para o lado interno da curva.

Devido a esse efeito, surge a força  $\mu_1 N_1$  dirigida para

o centro da via.

Tem-se na roda a resultante entre a força normal  $N_1$  e a força de atrito  $\mu_1 N_1$ , denominada  $R_1$ .

Decompondo-se essa força  $R_1$  em sua direção horizontal e vertical, encontram-se as forças  $Y_1$  e  $Q_1$ , para a roda livre.

Para esta roda, a componente horizontal  $Y_1$  é maior que a componente  $P_1$ , contrariamente ao efeito observado na Roda-2.

As forças de guia  $Y_1$  e  $Y_2$  possuem sentidos contrários, em consequência do efeito da inclinação da superfície de rolamento das rodas.

Do diagrama de forças da Roda-1 (Fig. 5.8), tem-se

$$Y_1 = N_1 \operatorname{sen} \gamma_1 + \mu_1 N_1 \operatorname{cos} \gamma_1$$

$$Q_1 = N_1 \operatorname{cos} \gamma_1 - \mu_1 N_1 \operatorname{sen} \gamma_1$$

Determinando-se a relação  $Y_1/Q_1$  resulta:

$$\frac{Y_1}{Q_1} = \operatorname{tg} (\gamma_1 + \rho_1) \quad (5.12)$$

#### 5.4.3 - Considerações sobre o descarrilhamento

Um descarrilhamento pela subida do friso da roda sobre o trilho, ocorre quando o movimento de descida deste friso por ação da força vertical é impedido.

Por questão de segurança, o ponto de contato entre roda e trilho não deve ultrapassar o ponto de inflexão da geometria do friso. Pois além deste ponto, qualquer balanço lateral do ro-deiro, provocado por uma perturbação da linha, tende a ocasionar uma subida da roda no trilho provocando o descarrilhamento. O coeficiente de descarrilhamento atinge seu máximo valor neste ponto.

De acordo com a equação (5.11), o valor limite deste



coeficiente é função de  $\gamma_{\text{m\grave{a}x}}$  e  $\rho$ . Para um mesmo perfil de roda, portanto  $\gamma_{\text{m\grave{a}x}}$  constante, o coeficiente  $\frac{Y_2}{Q_2}$  máximo depende de  $\rho$ , o qual varia com as condições de umidade, temperatura, depósitos sobre o trilho, etc. A favor da segurança deve tomar-se o menor valor sobre  $(\gamma_{\text{m\grave{a}x}} - \rho)$ , cuja tangente define o fator limite de descarrilhamento  $(\frac{Y_2}{Q_2})_{\text{lim}}$ . (Fig. 5.9).

Adota-se internacionalmente como critério de descarrilhamento a afirmação de que a relação  $Y_2/Q_2$  não permaneça acima do valor limite estabelecido.

Para um perfil de roda utilizado na Ferrovia de Carajás,  $\gamma_{\text{m\grave{a}x}} \cong 70^\circ$ . Admitindo-se  $\mu = 0,35$  (condições bastante desfavorável) o valor limite do fator de descarrilhamento é da ordem de 1,2.

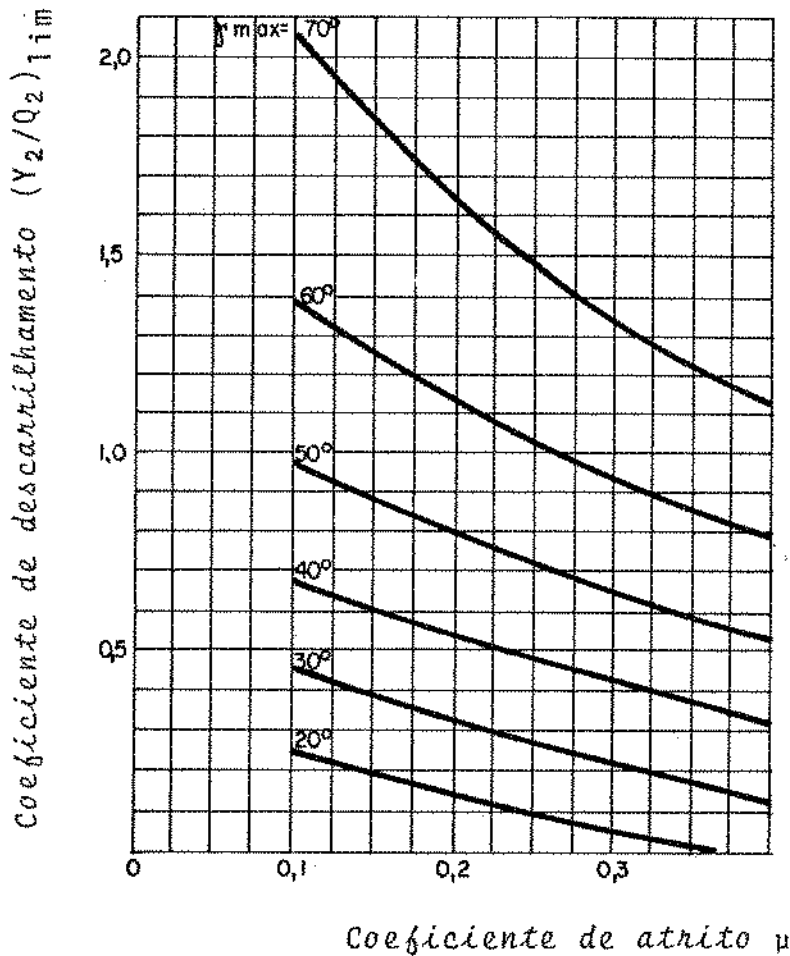


Figura 5.9 - Fator de descarrilhamento limite em função de  $\mu$  e  $\gamma_{\text{m\grave{a}x}}$ .

5.5 - Solicitação transversal da via - Critério Prud'Homme

A soma das forças de guia  $Y_1$  e  $Y_2$  é utilizada como um método ferroviário que envolve parâmetros adicionais para determinação da segurança do tráfego, método este desenvolvido por Prud'Homme - França [22]. O objetivo deste método é estabelecer um critério de segurança contra o deslocamento transversal da super-estrutura, isto é, a verificação dos valores da somatória das forças de guia durante a medição ao longo de um trecho, visando a não ultrapassagem de um valor limite estabelecido (Figura 5.10).

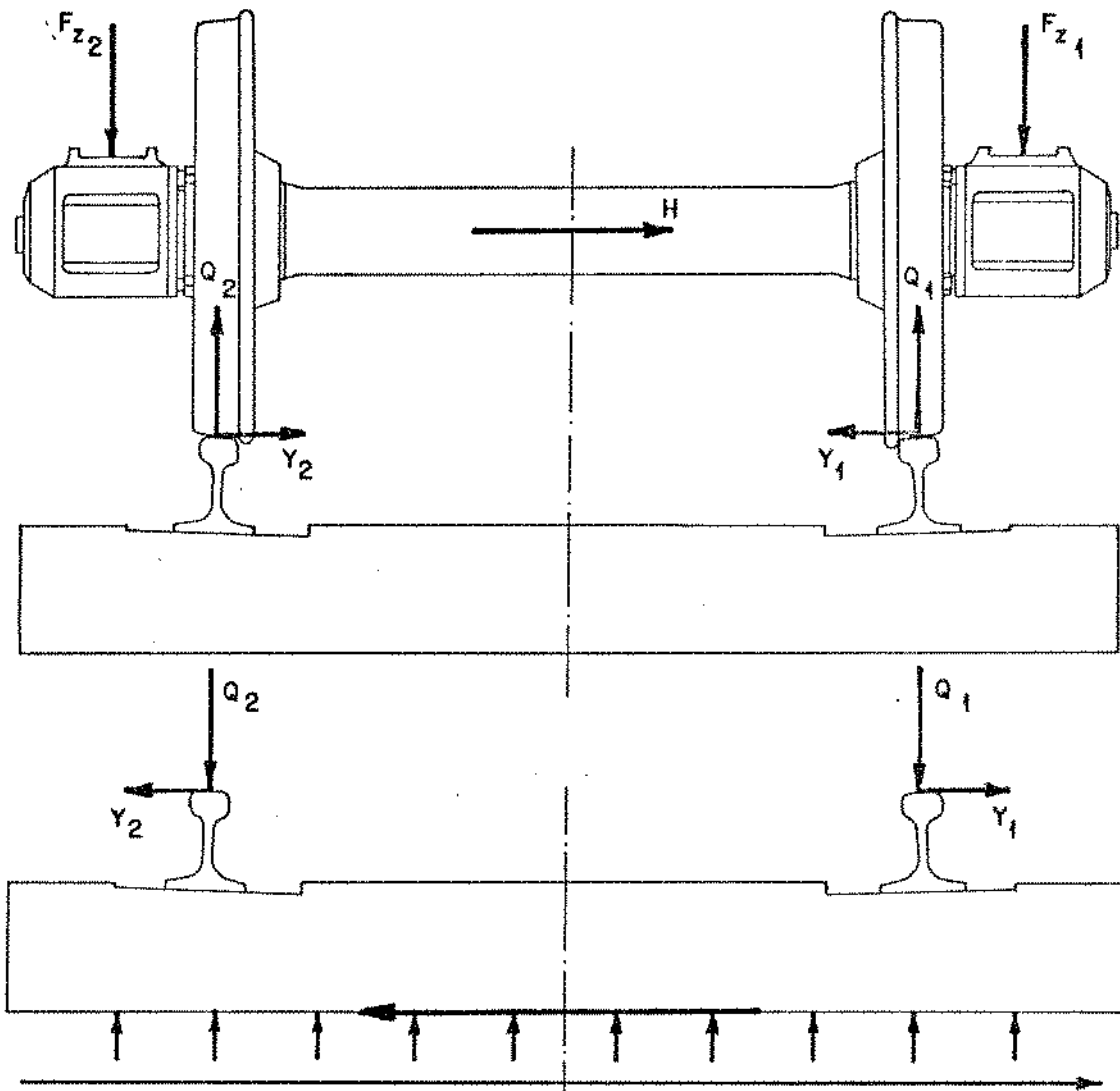


Figura 5.10- Esquema das forças atuantes na via.

O critério Prud'Homme toma como referência o comportamento da somatória  $Y_1 + Y_2$  ao longo da via, durante um percurso de dois metros. Neste percurso a somatória destas forças não pode permanecer constantemente acima de um valor limite estabelecido. A figura 5.11 apresenta esquematicamente o registro da somatória  $Y$  em função do percurso de via. Foram assinaladas na mesma, traços horizontais de extensão dois metros, nos quais o valor absoluto da somatória permanece constantemente acima de um determinado valor. Quando este valor ultrapassa um valor limite estabelecido (região A do gráfico), haverá perigo de deslocamento transversal da super-estrutura.

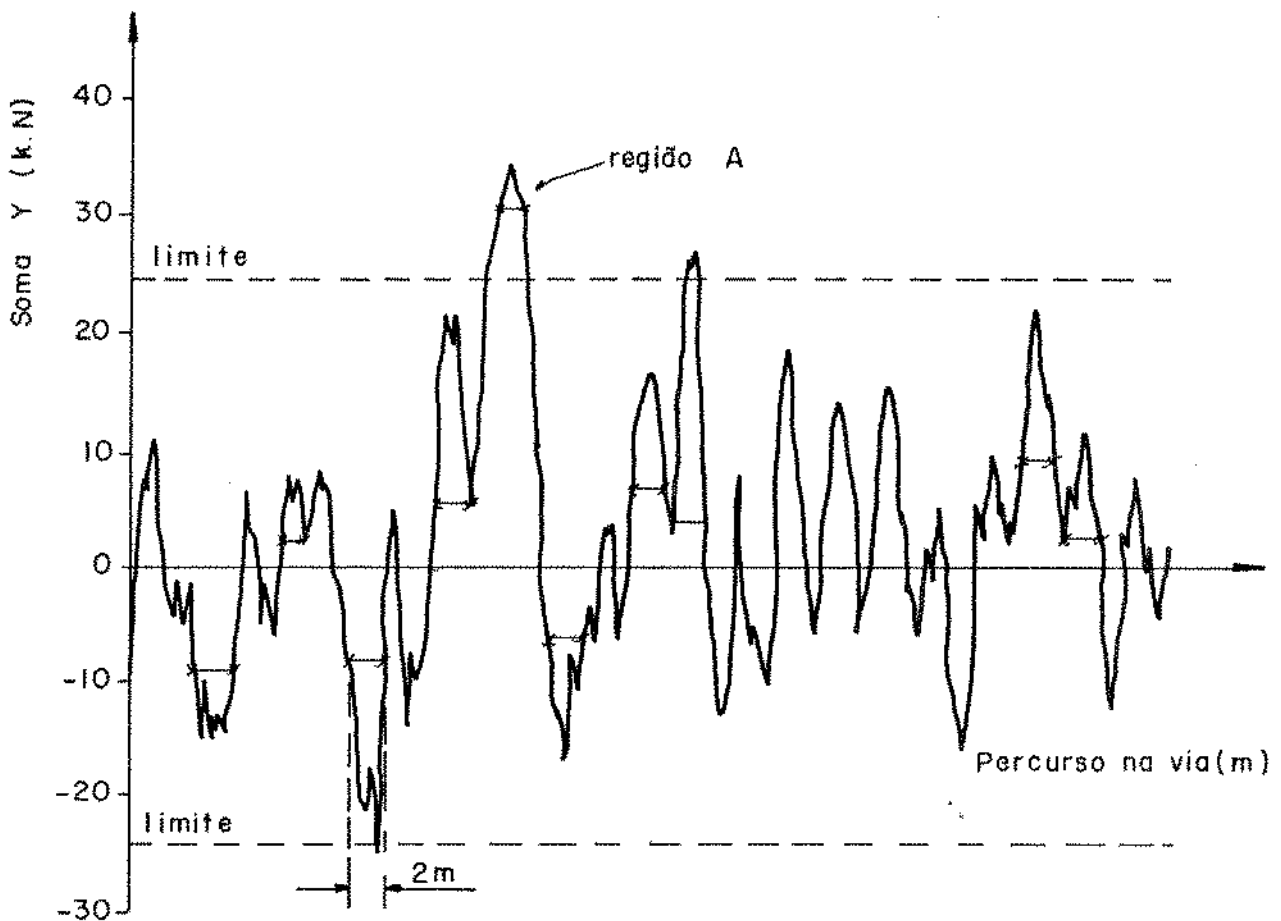


Figura 5.11 - Registro da somatória  $Y$  - Prud'Homme

Primeiramente Prud'Homme pesquisou o valor limite em vias com trilhos soldados, de 46 a 62 kg/m, com lastro de pedra britada, para vários tipos de dormentes, com 1 772 dormentes por km. A velocidade de tráfego foi de 40 a 60 km/h. O valor limite determinado nestas condições foi:

$$\lim (\Sigma Y)_{2m} = 10 + \frac{2 Q_0}{3}$$

Onde  $Q_0$  é a força vertical de apoio estática em kN.

Posteriormente as pesquisas foram estendidas para outras condições de via e compactação do lastro, estabelecendo um valor limite prático a favor da segurança em 85% do valor acima.

Este critério é hoje adotado em toda Europa, devendo ser satisfeita a equação:

$$(\Sigma Y)_{2m} \leq 0,85 \left( 10 + \frac{2 Q_0}{3} \right) \quad (5.13)$$

Segundo este critério os valores limites calculados para a CVRD são:

Vagão Gôndola vazio:

- com o truque COBRASMA  $\lim (\Sigma Y)_{2m} = 23,4$  kN
- com o truque FNV  $= 23,5$  kN
- com o truque LHB  $= 24,5$  kN

Vagão Gôndola carregado:

- com o truque COBRASMA  $\lim (\Sigma Y)_{2m} = 91,9$  kN
- com o truque FNV  $= 91,9$  kN
- com o truque LHB  $= 91,9$  kN

## 5.6 - Análise estatística comparativa

### 5.6.1 - Método de classificação

Para a avaliação de medições dinâmicas de caráter aleatório, como acontecem com as forças entre roda e trilho, utilizam-se métodos estatísticos de análise.

Para a avaliação dos truques optou-se pelo "Método do Valor Extremo II" [23]. Tal procedimento considera significativo'

no registro dinâmico, apenas os valores *máximos positivos relativos* e os valores *mínimos negativos relativos*. A figura 5.12 indica os pontos considerados.

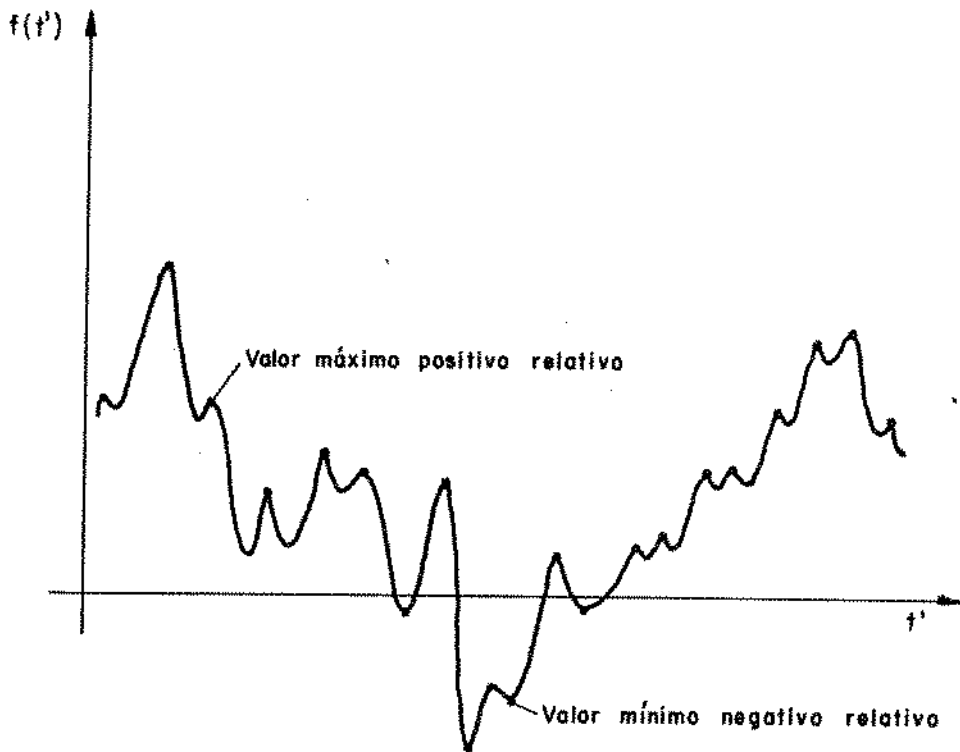


Figura 5.12 - Registro da grandeza  $f$  em função do tempo e indicação dos pontos considerados no método de análise "Método do Valor Extremo II".

Tem-se então uma grande quantidade de pontos extremos, os quais são o fundamento da análise. Uma vez que os eventos são de natureza aleatória, torna-se necessária a classificação dos mesmos. O registro é sub-dividido em classes de largura suficientemente pequena e representativa dos dados. A figura 5.13-a indica o registro da figura 5.12 com as classes sub-divididas.

Após a classificação conta-se o número de pontos por classe, construindo assim a curva de distribuição de frequência (Fig. 5.13-b).

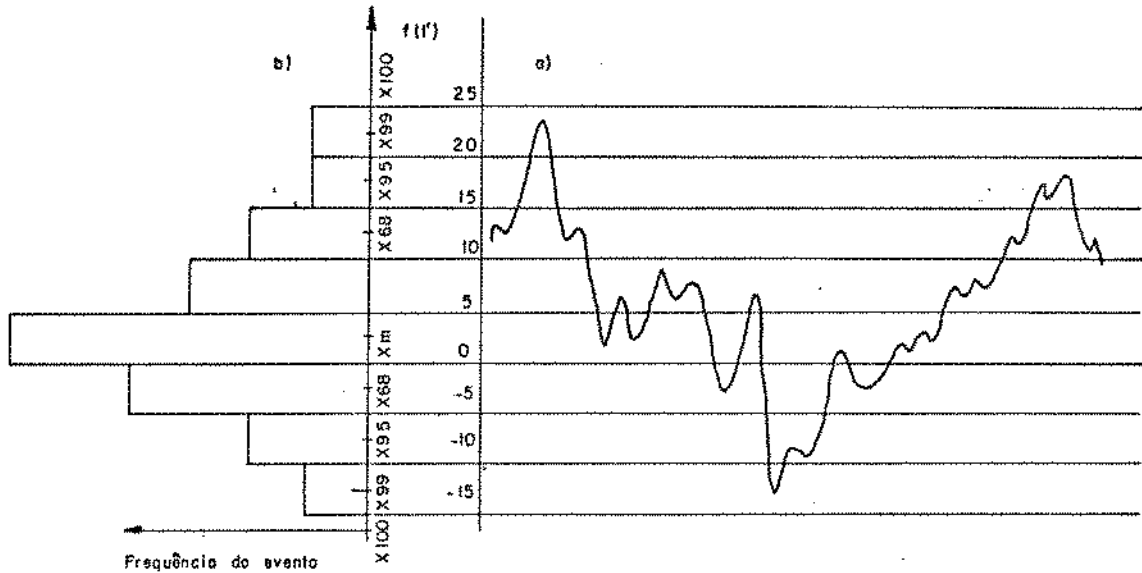


Figura 5.13 - Registro da grandeza  $f$ , com as classes e curva de distribuição de frequência.

São determinados o valor médio  $X_m$  e o valor  $X_p$ , que corresponde aquele que  $p\%$  da totalidade dos valores à direita da média ou à esquerda da média estão compreendidos entre  $X_p$  e  $X_m$ . Desse modo, temos para um mesmo  $p$  dois valores de  $X_p$ , isto é; um a direita da média e outro a esquerda. [24], [25]

Caso a distribuição fosse Gaussiana, os valores de  $p$  iguais a 68, 95 e 99% corresponderiam a um, dois, três desvios padrões em torno da média, à direita e à esquerda. São determinados os valores  $X_{68}$ ,  $X_{95}$  e  $X_{99}$  à direita e à esquerda da medida  $X_m$ , para cada condição de velocidade da composição. Após este procedimento, é aplicado o Método Estatístico de Classificação de Kendall, que será explicado a seguir, para os valores absolutos das diferenças entre  $X_{p\%}$  à direita e à esquerda da média  $X_m$ , para  $p$  igual a 68%, 95% e 99% para os valores obtidos na análise, tanto para a configuração U como P da composição. O valor  $X_{100\%}$  não é considerado na aplicação deste método, uma vez que pode não representar um valor estatístico, mas sim um único pico observado na linha, proveniente de um defeito localizado na via.

5.6.2 - Método Estatístico de Classificação de Kendall

Visando uma comparação do comportamento dos quatro protótipos de truques ensaiados, foi empregado o método de classificação de Kendall, que tem como finalidade a comparação de objetos quanto ao comportamento de uma grandeza mensurável em diferentes situações (propriedades). Visa uma classificação qualitativa dos objetos em diferentes situações, através do valor da grandeza de referência considerada [26] e [27].

Para melhor entendimento do método, é apresentado um exemplo simplificado. A tabela 5.1 mostra os valores de uma grandeza (por exemplo força), em diferentes situações para quatro objetos testados.

Tabela 5.1 - Resultados das medições de uma grandeza para diferentes objetos em diferentes situações

| PROPRIEDADE  | OBJETO |      |      |      |
|--------------|--------|------|------|------|
|              | OB1    | OB2  | OB3  | OB4  |
| $X_{68\%}$ P | 8,5    | 8,5  | 8,5  | 9,5  |
| $X_{68\%}$ U | 10,0   | 9,0  | 18,5 | 10,5 |
| $X_{95\%}$ P | 17,5   | 18,0 | 21,5 | 21,5 |
| $X_{95\%}$ U | 20,0   | 17,0 | 38,5 | 20,5 |
| $X_{99\%}$ P | 27,0   | 27,0 | 35,0 | 34,5 |
| $X_{99\%}$ U | 28,0   | 26,5 | 60,0 | 35,0 |

Através deste quadro constroem-se o quadro de classificação dos objetos Tabela 5.2, segundo cada propriedade. Neste quadro está indicada também a soma das posições atingidas nas dife-

rentes propriedades, para cada objeto. Observando-se esta soma tem-se a classificação final, de acordo com a ordem crescente da soma.

Tabela 5.2 - Classificação dos objetos

| PROPRIEDADE        | OBJETO |     |      |      |
|--------------------|--------|-----|------|------|
|                    | OB1    | OB2 | OB3  | OB4  |
| X <sub>68%</sub> P | 2,0    | 2,0 | 2,0  | 4,0  |
| X <sub>68%</sub> U | 2,0    | 1,0 | 4,0  | 3,0  |
| X <sub>95%</sub> P | 1,0    | 2,0 | 3,5  | 3,5  |
| X <sub>95%</sub> U | 2,0    | 1,0 | 4,0  | 3,0  |
| X <sub>99%</sub> P | 1,5    | 1,5 | 4,0  | 3,0  |
| X <sub>99%</sub> U | 2,0    | 1,0 | 4,0  | 3,0  |
| SOMA               | 10,5   | 8,5 | 21,5 | 19,5 |
| CLASSIFICAÇÃO      | 2º     | 1º  | 4º   | 3º   |

Para garantir a significância da classificação final, é utilizado o teste de significância de Kendall, o qual leva em conta a possibilidade de correlação entre as propriedades, dentro de um intervalo de confiança pré-estabelecido 95%.

A tabela 5.3 mostra uma ampliação do quadro anterior, onde aparecem grandezas características para a determinação da significância:

$t$  = número de repetições das classificações parciais.

$T = \sum(t^3 - t) =$  contribuição das repetições.



M = Média da SOMA (=15).

$d_i$  = Desvio da soma em relação a sua Média M.

Tabela 5.3 - Quadro geral para determinação da significância.

| PROPRIEDADE   | OBJETO |       |       |       | t                  | T             |
|---------------|--------|-------|-------|-------|--------------------|---------------|
|               | OB1    | OB2   | OB3   | OB4   |                    |               |
| $X_{68\%}$ P  | 2,0    | 2,0   | 2,0   | 4,0   | 3                  | 24            |
| $X_{68\%}$ U  | 2,0    | 1,0   | 4,0   | 3,0   | 0                  | 0             |
| $X_{95\%}$ P  | 1,0    | 2,0   | 3,5   | 3,5   | 2                  | 6             |
| $X_{95\%}$ U  | 2,0    | 1,0   | 4,0   | 3,0   | 0                  | 0             |
| $X_{99\%}$ P  | 1,5    | 1,5   | 4,0   | 3,0   | 2                  | 6             |
| $X_{99\%}$ U  | 2,0    | 1,0   | 4,0   | 3,0   | 0                  | 0             |
| SOMA          | 10,5   | 8,5   | 21,5  | 19,5  | M=15               | $\Sigma T=36$ |
| CLASSIFICAÇÃO | 2º     | 1º    | 4º    | 3º    | -                  | -             |
| $d_i^2$       | 20,25  | 42,25 | 42,25 | 20,25 | $\Sigma d_i^2=125$ | -             |

Define-se coeficiente de concordância de Kendall a expressão:

$$\bar{W} = \frac{12 \cdot S_0}{m^2(n^3-n) - \Sigma T} \quad \text{onde:}$$

$S_0$  = Soma dos quadrados dos desvios em relação a média.

m = nº de propriedades (6)

n = nº de objetos (4)

Para o exemplo em questão, chega-se ao valor  $W=0,76$ . Segundo Kendall, a fim de garantir a significância da classificação, dentro de uma confiança  $q$  (por exemplo 95%), é necessário que  $W$  seja maior ou igual a  $\alpha$ , fornecido na tabela 5.4, para o caso de  $n < 7$ . Quando o número de objetos for superior a 7, usa-se a distribuição de FISHER [26] e [27].

Tabela 5.4 - Coeficiente limite  $\alpha$  para teste de significância (tabela simplificada para  $q=95\%$ )

| n \ m | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 15   | 20   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3     | -    | -    | -    | -    | 0,38 | 0,30 | 0,20 | 0,15 |
| 4     | -    | 0,62 | 0,50 | 0,42 | 0,32 | 0,26 | 0,17 | 0,13 |
| 5     | 0,72 | 0,55 | 0,45 | 0,38 | 0,29 | 0,23 | 0,16 | 0,12 |
| 6     | 0,66 | 0,51 | 0,42 | 0,35 | 0,27 | 0,22 | 0,14 | 0,11 |
| 7     | 0,62 | 0,48 | 0,39 | 0,33 | 0,25 | 0,20 | 0,14 | 0,10 |

Para o caso em questão tem  $\alpha = 0,42$ , garantindo a classificação com 95% de confiança.

### 5.6.3 - Processamento dos registros e análise computacional

As grandezas gravadas em fita magnética foram processadas por computador no Centro de Tecnologia da UNICAMP. Os sinais analógicos obtidos na gravação eram transferidos para um digitalizador, e após processados pelo micro computador, os resultados eram impressos ou construídos os histogramas e curvas em geral. A figura 5.14 mostra o fluxograma da análise.

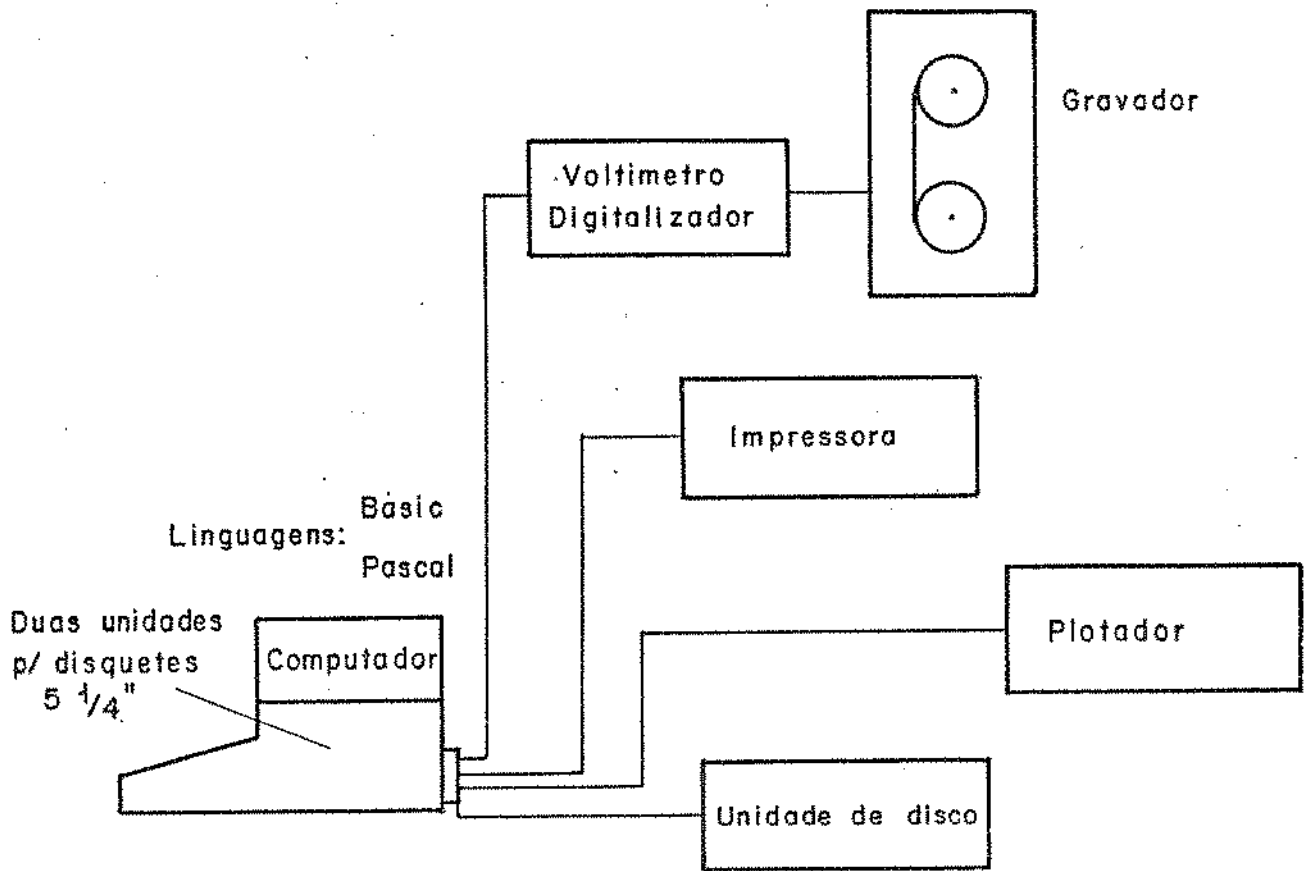


Figura 5.14 - Computador HP 9836 e seus periféricos , utilizado na avaliação do comportamento dos truques.

No anexo I são apresentados o detalhamento da instrumentação, a codificação e os programas elaborados, inclusive para a avaliação estatística segundo Kendall.

## CAPÍTULO 6

### AVALIAÇÃO DOS TRUQUES

#### 6.1 - Considerações Gerais

Conforme foi abordado no capítulo 5, deverão ser analisadas as seguintes grandezas: comportamento lateral; comportamento vertical; segurança contra o descarrilhamento; segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura e análise visual durante as viagens.

Para o comportamento lateral será efetuada a análise dos registros, inclusive a auto-excitação, assim como uma análise estatística comparativa da magnitude dos registros. Quanto ao comportamento vertical será efetuada somente a análise comparativa dos registros.

Na segurança contra o descarrilhamento, como também na segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura, serão verificadas se as grandezas características estão dentro dos limites fixados no capítulo anterior, bem como efetuada a análise comparativa.

Para a análise do comportamento, efetuou-se uma análise prévia dos registros, selecionando-se os sub-trechos citados nas tabelas 2.1 e 2.2. Os sub-trechos selecionados encontram-se na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Sub-trechos escolhidos para a análise

| Sub-trecho | Raio de Curvatura<br>(m) | Extensão<br>(m) |
|------------|--------------------------|-----------------|
| 1 - 2      | 905                      | 149             |
| 14 - 15    | 578                      | 123             |
| 24 - 25    | 849                      | 271             |
| 6 - 7      | -                        | 1016            |
| 10 - 11    | -                        | 732             |
| 20 - 21    | -                        | 770             |

Na análise estatística foram elaborados os histogramas de frequências para trechos representativos, em diferentes velocidades da composição. Estes trechos eram analisados, ou isoladamente ou em grupos (grupos de retas e grupos de curvas). A tabela 6.2 apresenta o selecionamento das viagens de medição, as quais representam o tráfego da composição nos diferentes trechos de teste.

#### 6.2 - Análise do comportamento lateral através dos registros

Para uma avaliação melhor do movimento lateral do rodéiro, isto é, a análise da somatória de  $Y$  e também dos gráficos de  $Y_1$  e  $Y_2$ , escolheu-se um sub-trecho com pequena variação de bitola, a fim de evitar possíveis influências da linha. O sub-trecho escolhido foi entre as placas 6 e 7, cuja variação de bitola encontra-se na tabela 2.1.

Através da análise do movimento lateral de auto-excitação da  $\Sigma Y$  chega-se à tabela 6.3, a qual indica a frequência do movimento e também o seu comprimento de onda da frequência fundamental.

Tabela 6.2 - Viagens escolhidas para análise estatística.

| TRUQUE              | VELOCIDADE<br>(km/h) | VAZIO   |         | CARREGADO |         |
|---------------------|----------------------|---------|---------|-----------|---------|
|                     |                      | Conf. U | Conf. P | Conf. U   | Conf. P |
| COBRASMA            | 40                   | 22 U    | 23 P    | 60 U      | 51 P    |
|                     | 50                   | 20 U    | 21 P    | 52 U      | 53 P    |
|                     | 60                   | 24 U    | 25 P    | 54 U      | 65 P    |
|                     | 70                   | 26 U    | 27 P    | 56 U      | 67 P    |
|                     | 80                   | 28 U    | 29 P    |           |         |
|                     | 90                   | 30 U    | 30 P    |           |         |
| FNV<br>com<br>C-PEP | 40                   | 23 U    | 24 P    | 75 U      | 76 P    |
|                     | 50                   | 25 U    | 26 P    | 77 U      | 78 P    |
|                     | 60                   | 27 U    | 28 P    | 79 U      | 80 P    |
|                     | 70                   | 15 U    | 16 P    | 81 U      | 82 P    |
|                     | 80                   | 29 U    | 30 P    |           |         |
|                     | 90                   | 21 U    | 22 P    |           |         |
| FNV<br>sem<br>C-PEP | 40                   | 33 U    | 34 P    | 67 U      | 68 P    |
|                     | 50                   | 35 U    | 36 P    | 69 U      | 70 P    |
|                     | 60                   | 37 U    | 38 P    | 71 U      | 72 P    |
|                     | 70                   | 39 U    | 40 P    | 73 U      | 74 P    |
|                     | 80                   | 41 U    | 42 P    |           |         |
|                     | 90                   | 43 U    | 46 P    |           |         |
| LHB                 | 40                   | 28 U    | 29 P    | 61 U      | 54 P    |
|                     | 50                   | 30 U    | 31 P    | 71 U      | 56 P    |
|                     | 60                   | 14 U    | 13 P    | 73 U      | 58 P    |
|                     | 70                   | 18 U    | 17 P    | 75 U      | 60 P    |
|                     | 80                   | 22 U    | 21 P    |           |         |
|                     | 90                   | 26 U    | 25 P    |           |         |

Tabela 6.3 - Valores obtidos na análise do movimento de de auto-excitação.

| TRUQUE              | VELOCIDADE<br>(km/h) | VAZIO                   |                                    | CARREGADO               |                                  |
|---------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                     |                      | FREQUÊNCIA<br>f<br>(Hz) | COMPRIMENTO<br>DE<br>ONDA L<br>(m) | FREQUÊNCIA<br>f<br>(Hz) | COMPRIMENTO<br>DE<br>ONDA<br>(m) |
| COBRASMA            | 40                   | 0,65                    | 17,09                              | amortecida              |                                  |
|                     | 50                   | 0,75                    | 18,52                              | 0,8                     | 17,36                            |
|                     | 60                   | 0,85                    | 19,61                              | 0,85                    | 19,61                            |
|                     | 70                   | 1,10                    | 17,68                              | 4,05                    | 18,52                            |
|                     | 80                   | 1,25                    | 17,78                              | -                       | -                                |
|                     | 90                   | 1,45                    | 17,24                              | -                       | -                                |
| FNV<br>com<br>C-PEP | 40                   | 0,65                    | 17,09                              | amortecida              |                                  |
|                     | 50                   | 0,80                    | 17,36                              |                         |                                  |
|                     | 60                   | 0,95                    | 17,54                              | 0,96                    | 17,36                            |
|                     | 70                   | 1,06                    | 18,34                              | 1,13                    | 17,21                            |
|                     | 80                   | 1,17                    | 18,99                              | -                       | -                                |
|                     | 90                   | 1,44                    | 17,36                              | -                       | -                                |
| FNV<br>sem<br>C-PEP | 40                   | 0,60                    | 18,64                              | amortecida              |                                  |
|                     | 50                   | 0,77                    | 18,04                              |                         |                                  |
|                     | 60                   | 1,04                    | 16,03                              | 0,86                    | 19,47                            |
|                     | 70                   | 1,23                    | 15,81                              | 1,0                     | 19,44                            |
|                     | 80                   | 1,42                    | 15,67                              | -                       | -                                |
|                     | 90                   | 1,92                    | 13,02                              | -                       | -                                |
| LHB                 | 40                   | 0,63                    | 17,58                              | 0,66                    | 16,81                            |
|                     | 50                   | 0,75                    | 18,52                              | 0,81                    | 17,15                            |
|                     | 60                   | 0,95                    | 17,54                              | 0,93                    | 17,92                            |
|                     | 70                   | 1,10                    | 17,68                              | 1,12                    | 17,36                            |
|                     | 80                   | 1,25                    | 17,78                              | -                       | -                                |
|                     | 90                   | 1,55                    | 16,13                              |                         |                                  |

De acordo com o que foi apresentado no item 5.2, o comprimento de onda  $L_1$  do rodeiro livre é de 17,7 m. Referindo-se ao truque, este comprimento de onda variaria de acordo com sua concepção de projeto. É aconselhável que o rodeiro apresente uma oscilação auto-excitada, permitindo assim um desgaste regular da banda de rolamento da roda. Por outro lado, o truque deverá ter um sistema de amortecimento suficiente, a fim de absorver as irregularidades da via, sem provocar choques repetidos do friso da roda com o trilho.

Analisando-se a tabela 6.3, constata-se que os truques COBRASMA, FNV com C-PEP e LHB apresentam comprimentos de onda  $L_1$  próximo do valor acima calculado. O truque FNV sem C-PEP apresentou uma progressiva diminuição do comprimento de onda  $L_1$  com o aumento da velocidade. Esta diminuição do comprimento de onda pode levar o truque a uma instabilidade.

Analisando-se os registros das forças de quia obtidos na velocidade de 90 km/h para o truque LHB, com o vagão vazio (Fig. 6.1), observa-se repetidas pancadas do friso da roda com o trilho, indicando um movimento instável do rodeiro. Isto provém do fraco amortecimento lateral do truque, prejudicando a sua estabilidade, assim como ocasionando um desgaste prematuro do friso da roda. Constatou-se também que a partir da velocidade de 70 km/h, há o início de instabilidade. Desta forma, não é permitido o seu tráfego a partir desta velocidade. Para o truque LHB com o vagão carregado, o comportamento lateral é estável até a velocidade de 70 km/h (Fig. 6.2).

Para o truque FNV sem C-PEP, a instabilidade tem início a 70 km/h com o vagão vazio. Acima desta velocidade existem também repetidas pancadas do friso da roda com o trilho (Fig. 6.3). Para o vagão carregado até 70 km/h o movimento é estável (Fig. 6.4).

Os truques COBRASMA e FNV com C-PEP não apresentam sinais de instabilidade, como se observa nas figuras 6.5 e 6.6.



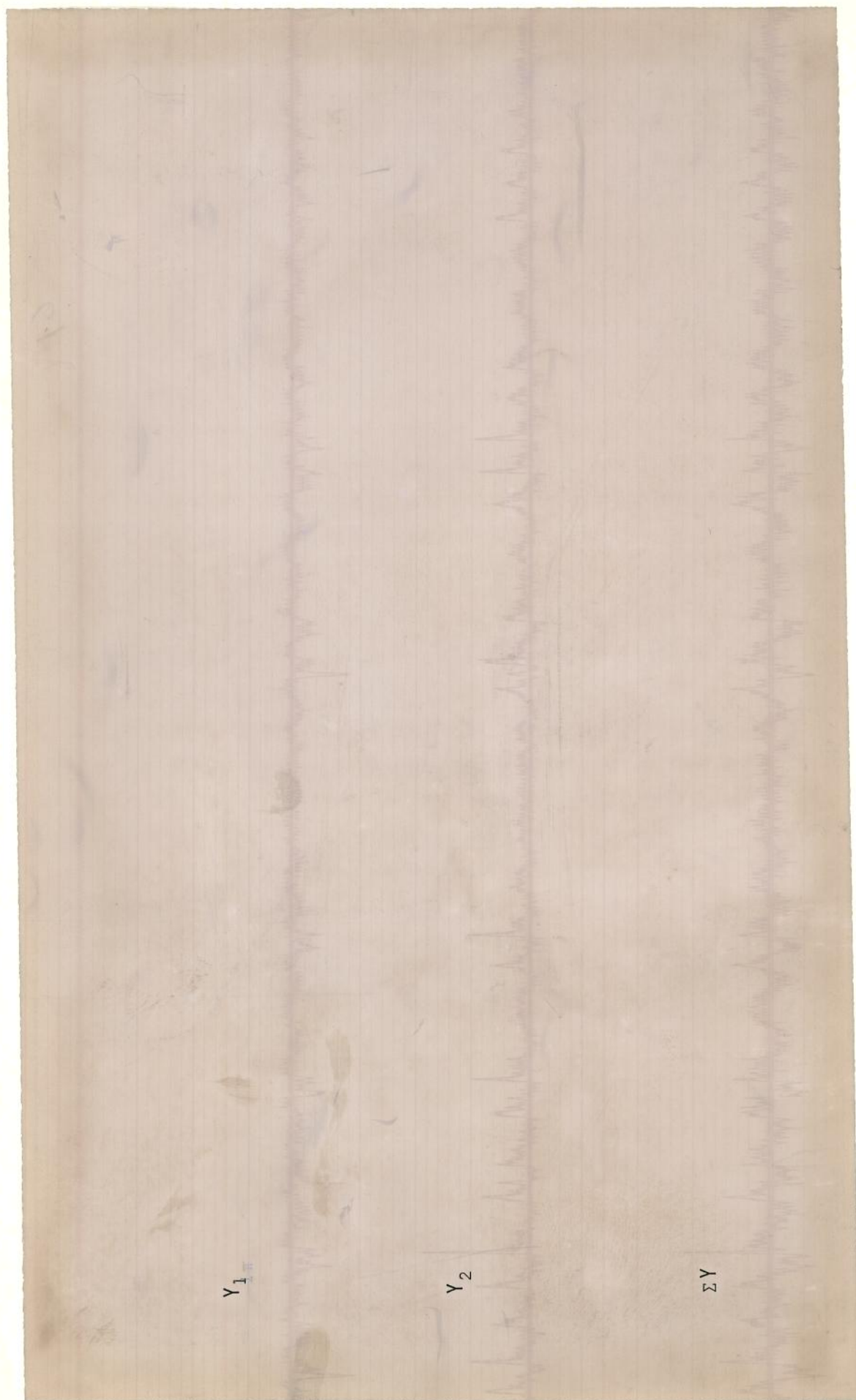


Figura 6.1 - Registro das forças  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $\Sigma Y$  para o truque LHB, com vagão vazio, a 90 km/h.

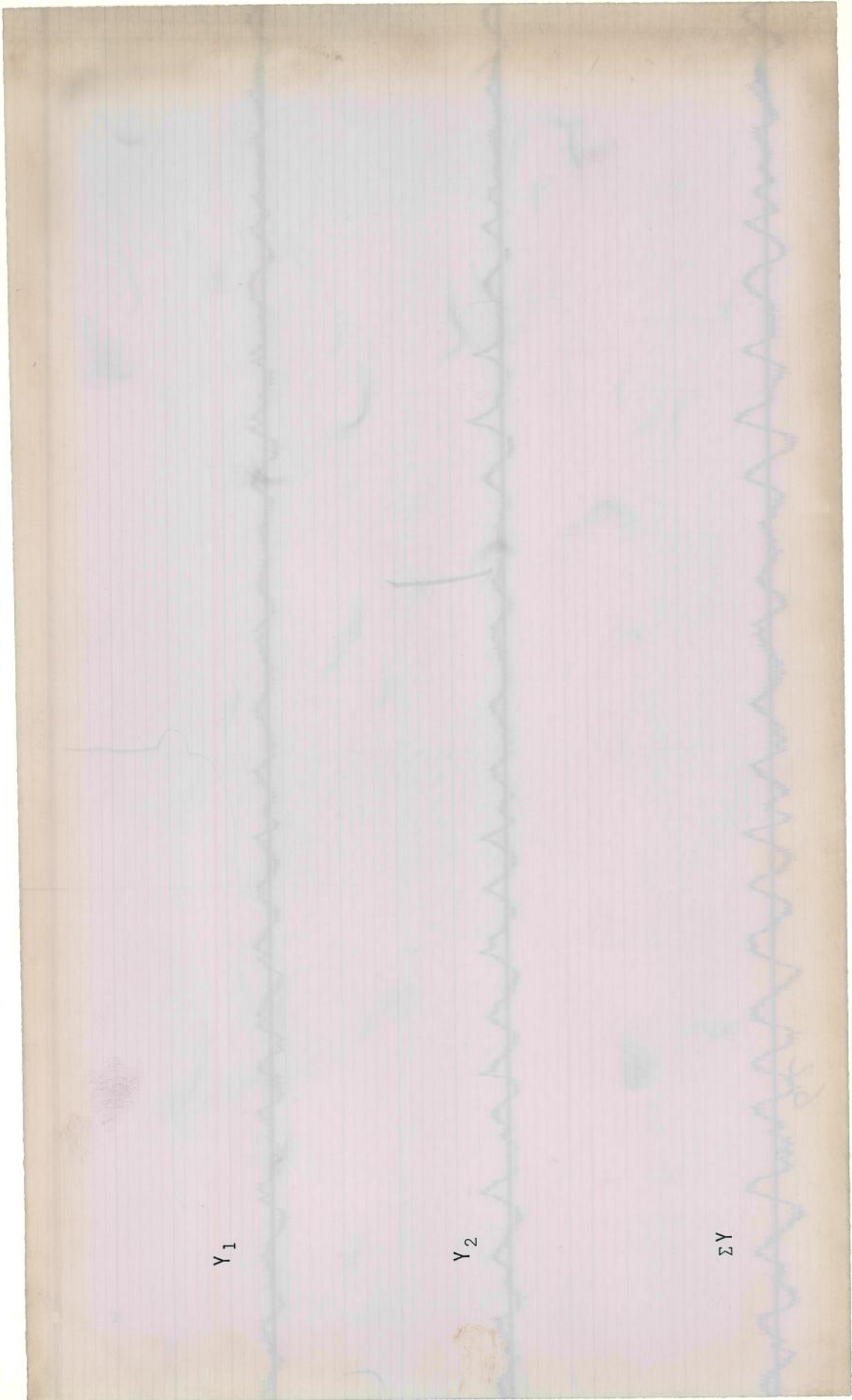


Figura 6.2 - Registro das forças  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $\Sigma Y$  para o truque LHB, com vagão carregado, a 70 km/h.

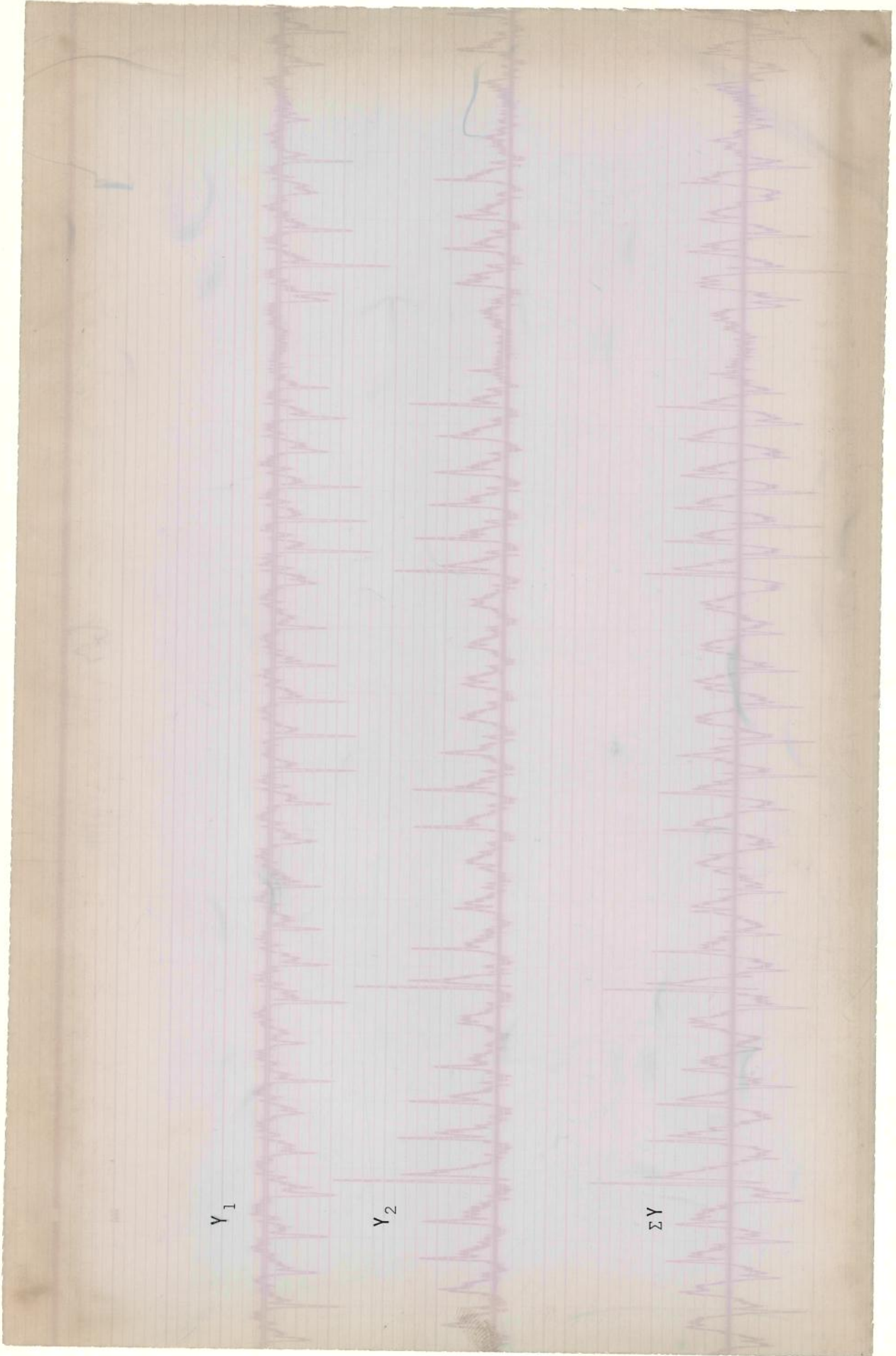


Figura 6.3 - Registro das forças  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $\Sigma Y$  para o truque FNV sem C-PEP, com vagão vazio, a 90 km/h.



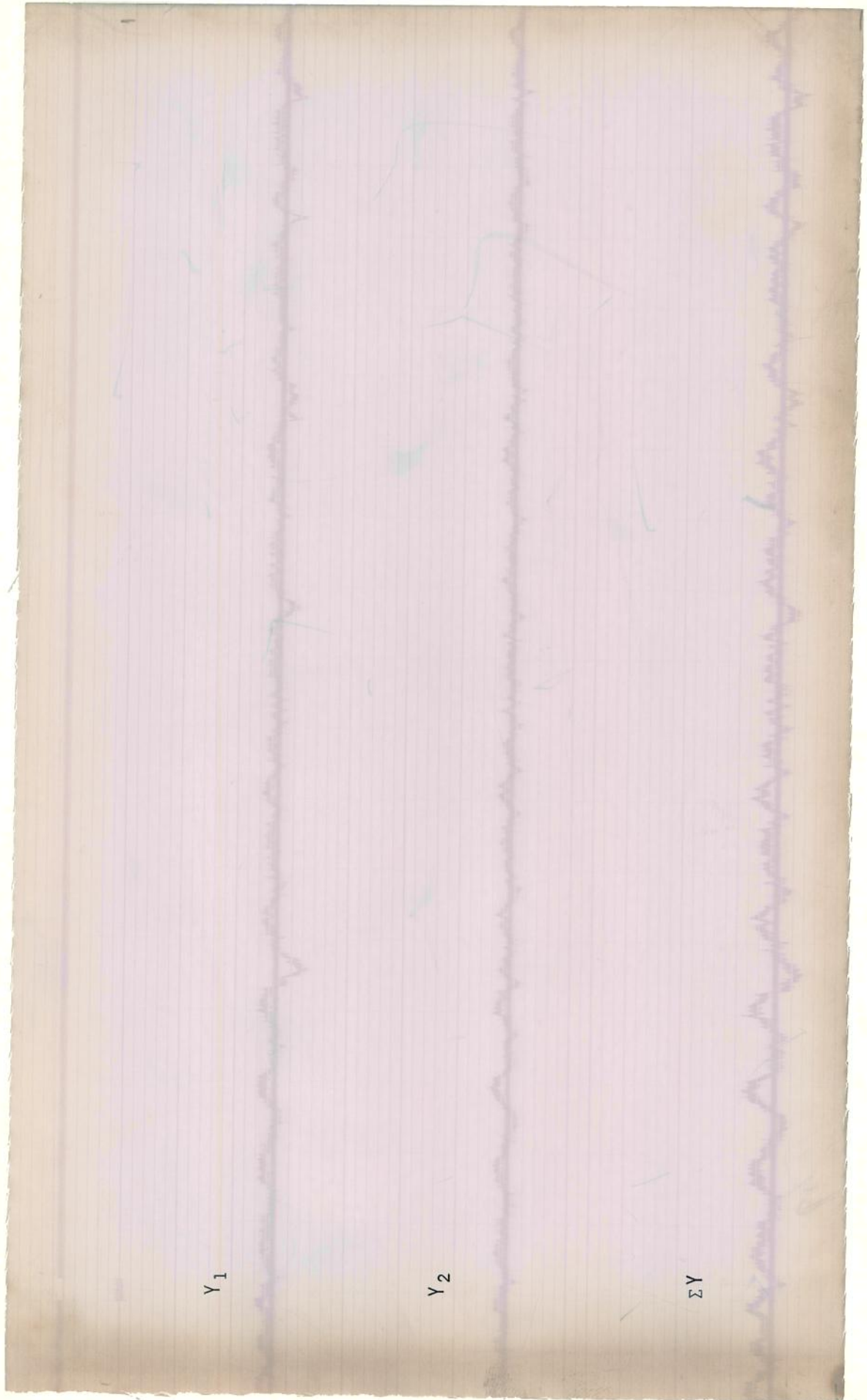


Figura 6.4 - Registro das forças  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $\Sigma Y$  para o truque FNV sem C-PEP, com vagão carregado, a 70 km/h.

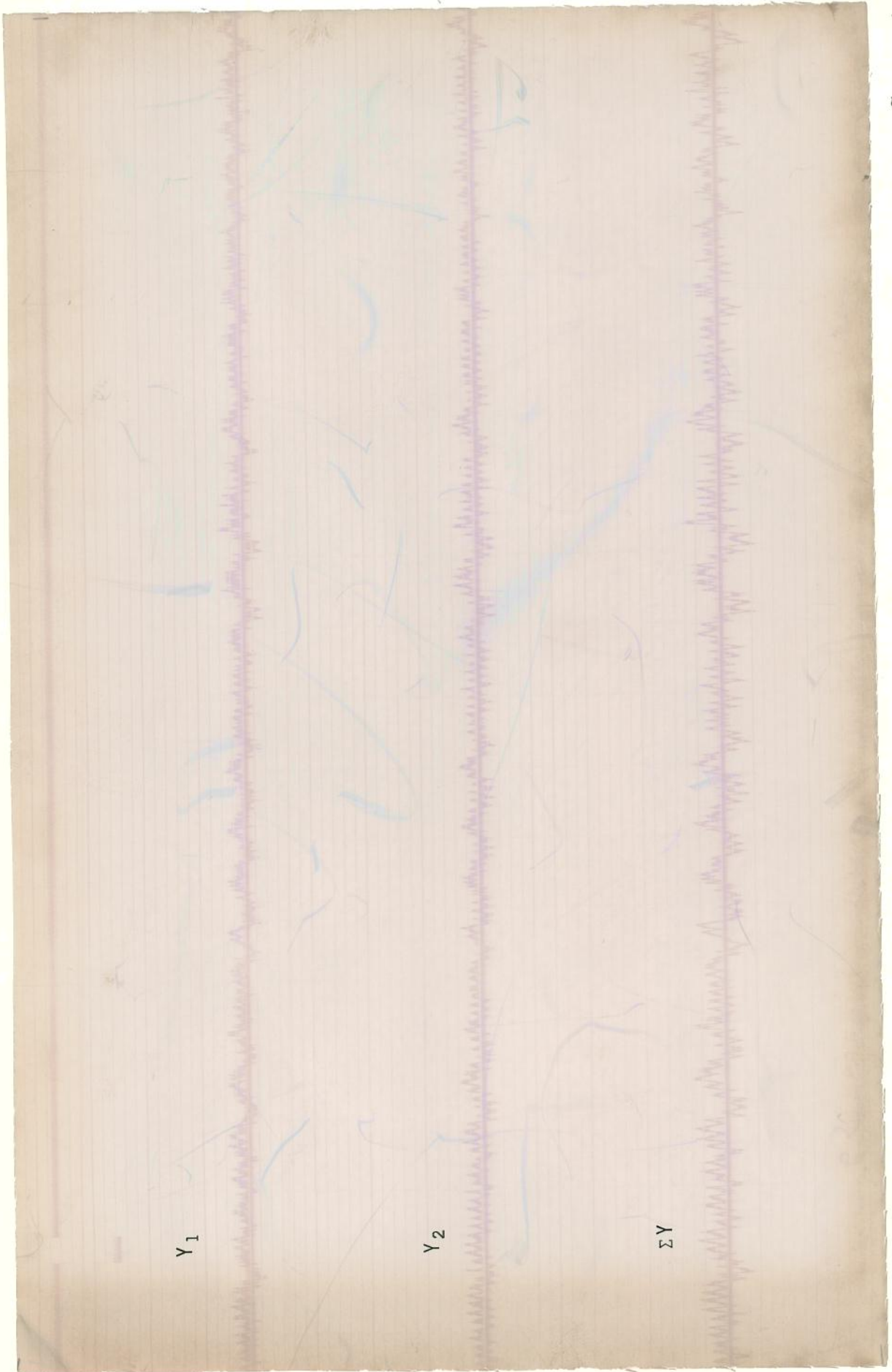


Figura 6.5 - Registro das forças  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $\Sigma Y$  para o truque COBRASMA, com vagão vazio, a 90 km/h.

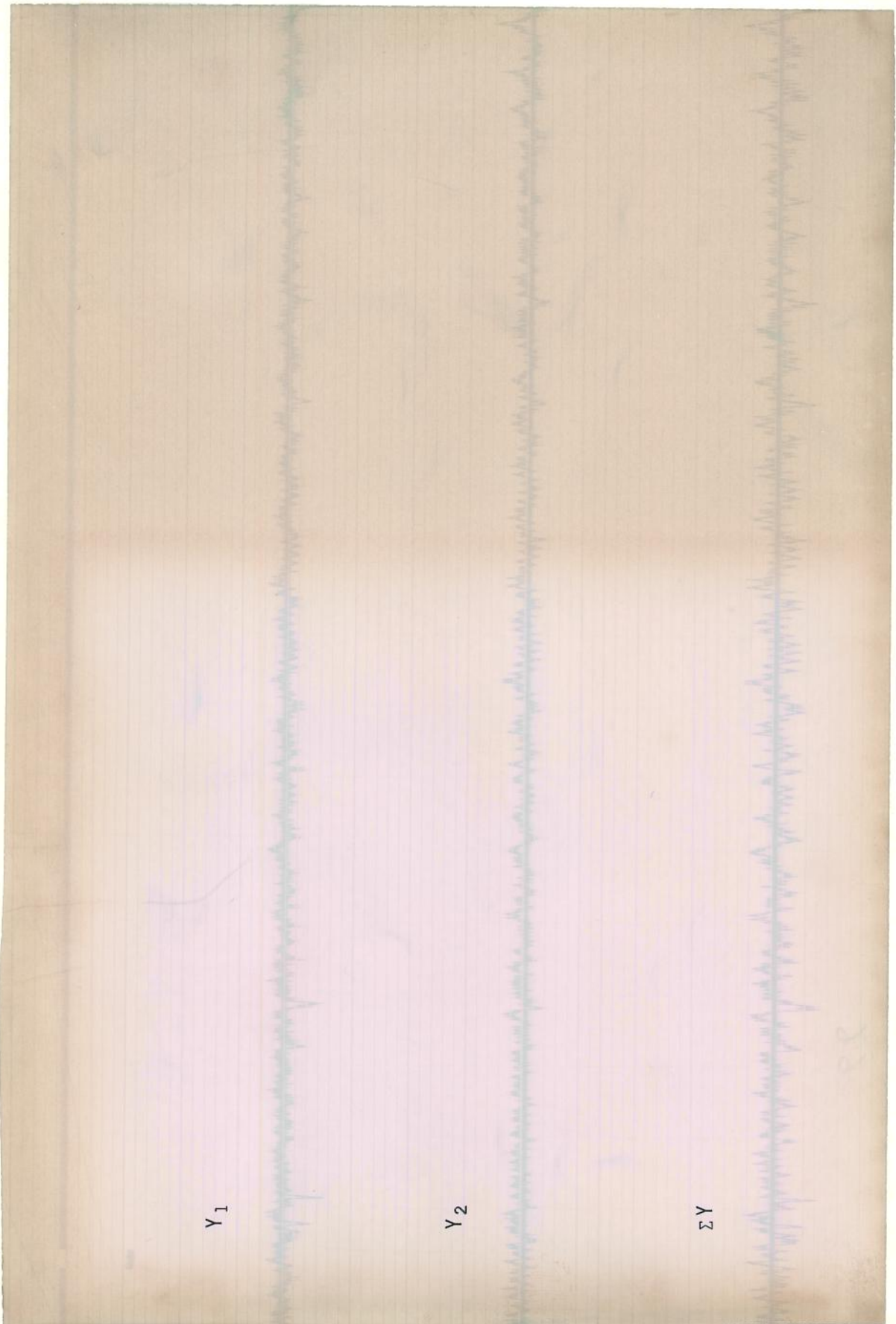


Figura 6.6 - Registro das forças  $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $\Sigma Y$  para o truque FNV com C-PEP, com vagão vazio, a 90 km/h.



Atendendo a solicitação da CVRD e sugestão da LHB, foram realizadas viagens de medição com vagões vazios e rodas reperfiladas com geometria de perfil desgastado, tipo europeu. A razão destes novos ensaios foi a busca de uma melhor estabilidade dinâmica lateral do truque LHB. Foram reperfilados quatro rodeiros, pela CVRD, os quais foram montados no último vagão da composição. As grandezas medidas foram as indicadas no item 3.3.3 g, nas velocidades 70 e 80 km/h. As viagens a 90 km/h não foram efetuadas, uma vez que a 80 km/h atingia-se o limite de segurança de viagem, pois o truque apresentava comportamento intermitentemente instável. A figura 6.7 mostra dois registros, um com roda reperfilada e outra com roda de perfil cônico. Pode-se observar na grandeza  $d_{yi}$  a vantagem da roda reperfilada. Não foram medidas as forças entre roda e trilho, uma vez que não houve possibilidade de reperfilagem do rodeiro instrumentado.

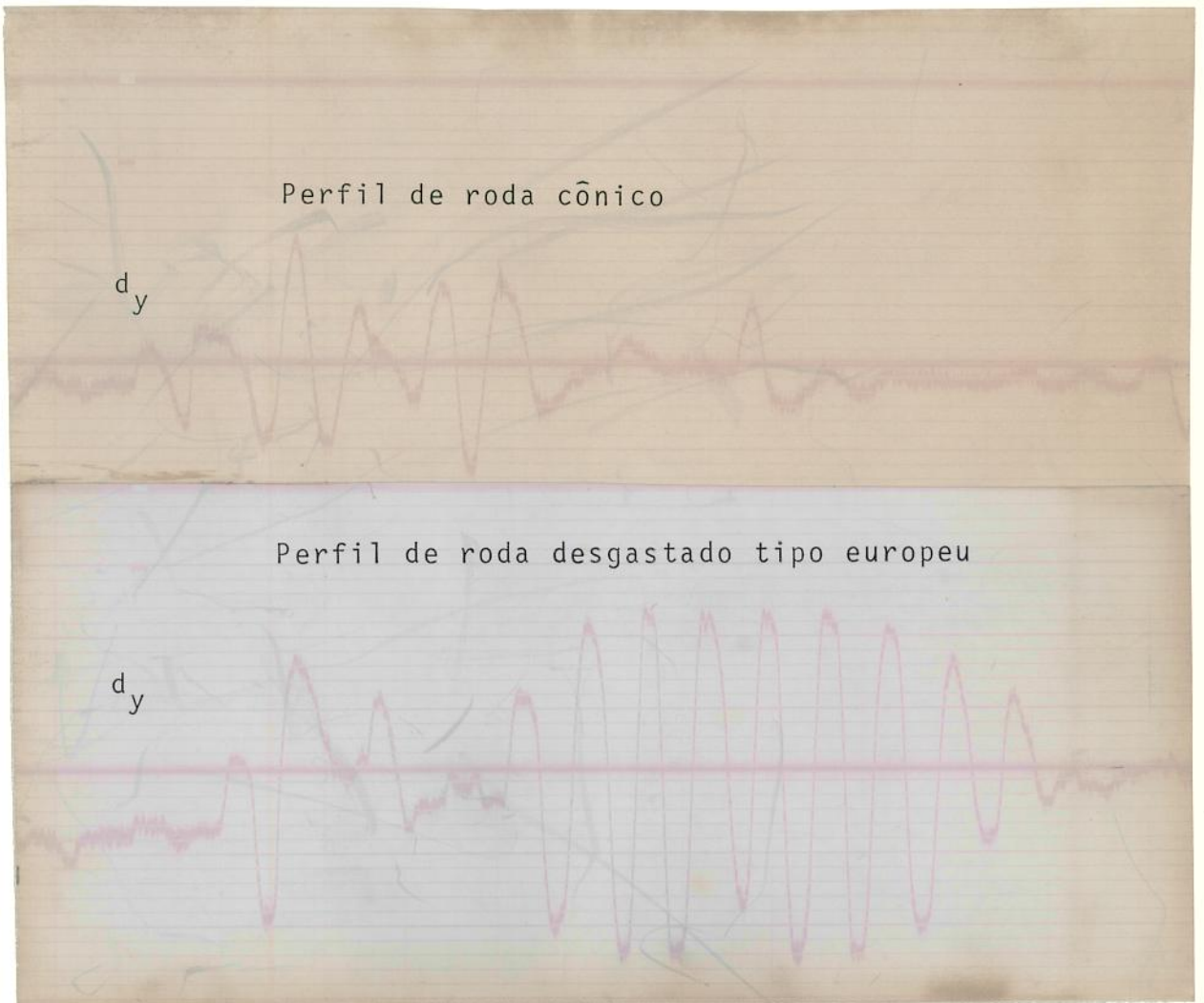


Figura 6.7 - Registro do deslocamento lateral ( $d_y$ ) da caixa de rolamento do truque LHB.

### 6.3 - Análise do comportamento lateral através de observação visual

Com a finalidade de se observar visualmente o comportamento do truque em viagem, foi construído um dispositivo atrás do último vagão, o qual permitia o alojamento de um observador. Notou-se nitidamente no truque FNV sem C-PEP, em velocidade superior a 70 km/h, um movimento oscilatório rotativo das laterais, além do deslocamento acentuado do rodeiro, transversalmente à via, movimento esse indesejável.

Com relação ao truque LHB, em viagem acima de 70 km/h com o vagão vazio, notou-se também um acentuado movimento transversal do rodeiro, além de pancadas constantes da caixa de rolamento com o quadro do truque. Este comportamento foi observado, tanto com o perfil cônico da roda, como no perfil desgastado, sendo que neste último caso esta ocorrência foi maior. Após o término das viagens de medição, as caixas de rolamentos e a estrutura do truque foram examinadas, apresentando sinais nítidos de amassamento, comprometendo os rolamentos.

Com relação aos truques COBRASMA e FNV com C-PEP a análise visual não mostrou ocorrências de pancadas, assim como movimentos acentuados, como nos casos anteriores.

### 6.4 - Análise da segurança ao descarrilhamento - Critério do valor limite do fator $Y/Q$

Durante as viagens de medição foi controlada a condição do valor limite  $Y/Q$  ser igual ou inferior a 1,2. Constatou-se que em nenhum dos truques este valor foi atingido, tanto para o vagão carregado como em vazio, nas diferentes velocidades de tráfego. A tabela 6.4 apresenta os valores máximos de pico do fator  $Y/Q$  para os quatro truques testados.



Tabela 6.4 - Valores máximos do fator Y/Q

| Trecho em Reta |           | TRUQUE   |             |             |      |
|----------------|-----------|----------|-------------|-------------|------|
|                |           | COBRASMA | FNV c/C-PEP | FNV s/C-PEP | LHB  |
| Reta           | Vazio     | 0,69     | 0,79        | 1,15        | 0,98 |
|                | Carregado | 0,32     | 0,37        | 0,27        | 0,55 |
| Curva          | Vazio     | 0,88     | 0,80        | 0,91        | 0,76 |
|                | Carregado | 0,56     | 0,46        | 0,43        | 0,42 |

6.5 - Análise da segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura - Critério Prud'Homme

No item 5.5 do capítulo anterior, estabeleceram-se os valores limites da somatória das forças de guia  $(\Sigma Y)_{2m}$  para cada tipo de truque, em condições de vagão carregado e vazio. Durante as viagens de medição constatou-se que tais valores não foram atingidos. A tabela 6.5 apresenta os valores máximos da  $(\Sigma Y)_{2m}$  para os truques testados.

Tabela 6.5 - Valores máximos da  $(\Sigma Y)_{2m}$  em kN, para os truques.

| Trecho em Reta |           | Truque   |             |             |      |
|----------------|-----------|----------|-------------|-------------|------|
|                |           | COBRASMA | FNV c/C-PEP | FNV s/C-PEP | LHB  |
| Reta           | Vazio     | 9,5      | 7,0         | 8,5         | 7,5  |
|                | Carregado | 29,0     | 34,0        | 31,0        | 37,0 |
| Curva          | Vazio     | 11,5     | 9,5         | 12,0        | 12,5 |
|                | Carregado | 42,0     | 59,0        | 48,0        | 43,0 |

## 6.6 - Análise estatística comparativa do comportamento lateral

### 6.6.1 - Comportamento dinâmico em retas

Foram traçadas as curvas de distribuição de frequência para os trechos em reta, considerados como um único trecho. Para o vagão vazio foram analisadas as velocidades de tráfego 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h, para as configurações U e P da composição. Foram traçadas pelo ploter do computador HP, 48 diagramas de distribuição de frequência. A título ilustrativo, encontram-se no Anexo II oito curvas de distribuição da  $\Sigma Y$ , para os truques COBRASMA, FNV com C-PEP, FNV sem C-PEP e LHB, nas configurações U e P a 90 km/h (Figs. 1 a 8 do Anexo II).

Analisando-se estas curvas de distribuição, observa-se a forma básica da curva, indicando o comportamento do truque, e em alguns casos, picos isolados provenientes do comportamento de perturbação, os quais são indesejáveis. Através dos 48 diagramas citados, foi possível a construção das curvas globais do comportamento dos valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  da  $\Sigma Y$  em função da velocidade da composição (vide item 5.6). As figuras 9 a 16 do Anexo II apresentam estas curvas.

Não considerando-se o fator desgaste das rodas, no ponto de vista da estabilidade dinâmica, o melhor truque seria aquele que apresentasse o feixe de curvas mais próximo de zero, consequentemente a curva de distribuição mais aguda (Figs. 1 a 8 do Anexo II). Quanto ao desgaste da roda, uma curva aguda de distribuição permite um desgaste localizado, originando no decorrer do tempo uma geometria de perfil semelhante a indicada na figura 6.8, o que causará um movimento instável. Pois comparando-se esta figura com a 5.8, observa-se que as componentes  $Y_1$  e  $Y_2$  estão no mesmo sentido.

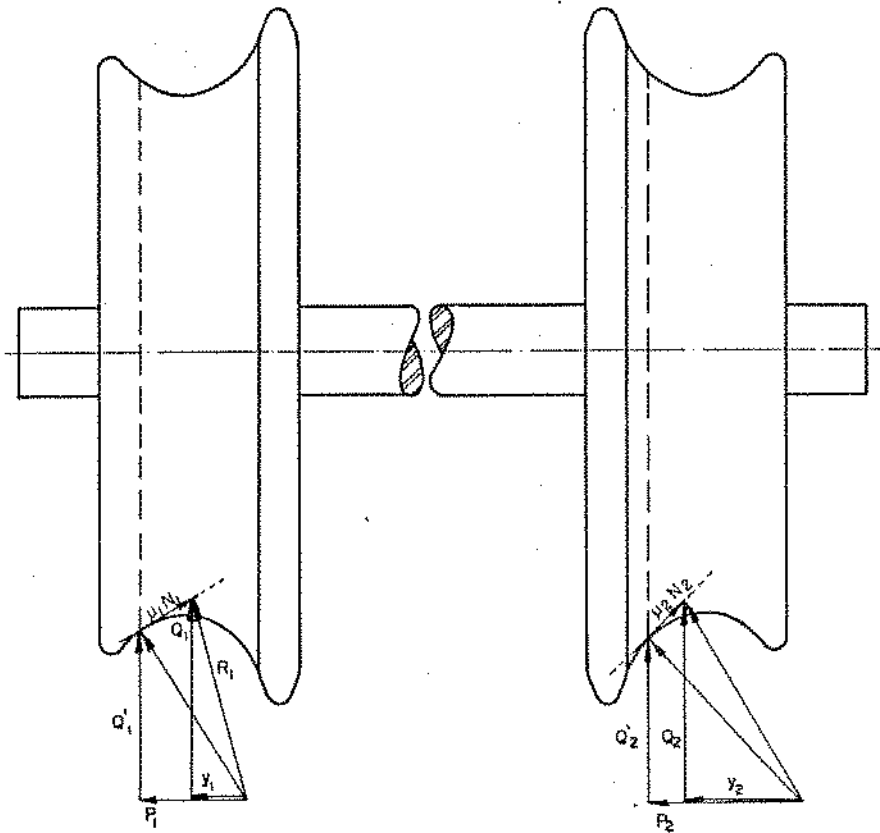


Figura 6.8 - Geometria do perfil da banda de rolamento que provoca um movimento instável do rodeiro.

Neste caso a Companhia Ferroviária deve controlar o desgaste através do reperfilamento da roda. Por outro lado, uma curva de distribuição menos aguda, permitirá um desgaste mais homogêneo da banda de rolamento. Para tanto, deverá ser pesquisado pe la Companhia Ferroviária o perfil ideal desgastado para cada truque.

Para melhor análise das figuras 9 a 16, foi aplicado o Método de Classificação de Kendall (vide item 5.6.1). A tabela 6.6 apresenta a classificação dos truques para as velocidades mais significativas (70, 80 e 90 km/h para o vagão vazio), a somatória das classificações, assim como a classificação global, de acordo com a ordem crescente da somatória.

Tabela 6.6 - Classificação dos truques quanto ao comportamento lateral nas retas com os vagões vazios

| Velocidade<br>Truque                      | 70 km/h | 80 km/h | 90 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 2       | 2       | 5                                | 2º                      |
| FNV com C-PEP                             | 2       | 1       | 1       | 4                                | 1º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 3       | 3       | 4       | 10                               | 3º                      |
| LHB                                       | 4       | 4       | 3       | 11                               | 4º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 95%     | 85%     | 99%     | -                                | -                       |

Para o vagão carregado foram analisadas as velocidades de tráfego 40, 50, 60 e 70 km/h, para as configurações U e P da composição. Foram traçados pelo ploter do computador HP, 32 diagramas de distribuição de frequência. A título ilustrativo, encontram-se no Anexo II 8 curvas de distribuição da  $\Sigma Y$  para os quatro tipos de truques a 90 km/h (Figs. 17 a 24 do Anexo II).

Através dos 32 diagramas citados, foi possível a construção das curvas globais do comportamento dos valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  da  $\Sigma Y$  em função da velocidade da composição. As figuras 25 a 32 do Anexo II apresentam estas curvas globais.

Analogamente ao caso anterior, aplicou-se o método de classificação de Kendall, obtendo-se a tabela 6.7, a qual indica a classificação dos truques para as velocidades mais significativas (50, 60 e 70 km/h para o vagão carregado), a somatória das classificações, assim como a classificação global de acordo com a ordem crescente da somatória.

Tabela 6.7 - Classificação dos truques quanto ao comportamento lateral em reta, com os vagões carregados.

| Truque \ Velocidade                 | Velocidade |         |         | Somatória da Classificação | Classificação Global |
|-------------------------------------|------------|---------|---------|----------------------------|----------------------|
|                                     | 50 km/h    | 60 km/h | 70 km/h |                            |                      |
| COBRASMA                            | 1          | 2       | 1       | 4                          | 10                   |
| FNV com C-PEP                       | 3          | 3       | 3       | 9                          | 30                   |
| FNV sem C-PEP                       | 2          | 1       | 2       | 5                          | 20                   |
| LHB                                 | 4          | 4       | 4       | 12                         | 40                   |
| Critério de Significância ACEITÁVEL | 95%        | 85%     | 95%     | -                          | -                    |

6.6.2 - Comportamento dinâmico nas curvas

Foram traçadas as curvas de distribuição de frequência para os trechos em curva, considerados como um único trecho. Para o vagão vazio, foram analisadas as velocidades de tráfego 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h, para as configurações U e P da composição. Foram traçados 48 diagramas de distribuição. Através destes diagramas, construíram-se os diagramas globais, permitindo através do método de classificação de Kendall, elaborar a tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Classificação dos truques quanto ao comportamento lateral em curva, com o vagão vazio.

| Truque \ Velocidade                 | Velocidade |         |         | Somatória da Classificação | Classificação Global |
|-------------------------------------|------------|---------|---------|----------------------------|----------------------|
|                                     | 70 km/h    | 80 km/h | 90 km/h |                            |                      |
| COBRASMA                            | 2          | 3       | 3       | 8                          | 30                   |
| FNV com C-PEP                       | 1          | 1       | 1       | 3                          | 10                   |
| FNV sem C-PEP                       | 3          | 2       | 2       | 7                          | 20                   |
| LHB                                 | 4          | 4       | 4       | 12                         | 40                   |
| Critério de Significância ACEITÁVEL | 85%        | 85%     | 95%     | -                          | -                    |

Para o vagão carregado, através de procedimento análogo, chega-se à tabela 6.9 que fornece a classificação global segundo Kendall.

Tabela 6.9 - Classificação dos truques quanto ao comportamento lateral em curvas, para o vagão carregado

| Truque \ Velocidade                 | Velocidade |         |         | Somatória da Classificação | Classificação Global |
|-------------------------------------|------------|---------|---------|----------------------------|----------------------|
|                                     | 50 km/h    | 60 km/h | 70 km/h |                            |                      |
| COBRASMA                            | 1          | 1       | 1       | 3                          | 10                   |
| FNV com C-PEP                       | 4          | 3       | 3       | 10                         | 30                   |
| FNV sem C-PEP                       | 3          | 2       | 2       | 7                          | 20                   |
| LHB                                 | 2          | 4       | 4       | 10                         | 30                   |
| Critério de Significância ACEITÁVEL | 85%        | 85%     | 95%     | -                          | -                    |

Para a avaliação dos truques, é de interesse os valores  $X_{100\%}$  da  $\Sigma Y$ . Na tabela 6.10 encontram-se as amplitudes pico a pico desta somatória.

Tabela 6.10 - Valores da amplitude pico a pico da  $\Sigma Y$ , em kN, para os truques

| Trecho em Reta |           | TRUQUE   |             |             |       |
|----------------|-----------|----------|-------------|-------------|-------|
|                |           | COBRASMA | FNV c/C-PEP | FNV s/C-PEP | LHB   |
| Reta           | Vazio     | 52,5     | 62,5        | 85,0        | 87,5  |
|                | Carregado | 76,0     | 135,0       | 121,0       | 113,0 |
| Curva          | Vazio     | 51,5     | 45,5        | 61,5        | 64,5  |
|                | Carregado | 100,0    | 145,0       | 140,0       | 125,0 |

Analisando-se a tabela 6.10 para o vagão vazio e em reta, o truque COBRASMA apresenta os menores efeitos dinâmicos; já para o vagão vazio em curva, o FNV com C-PEP tem o seu primeiro lugar. Quanto à análise para o vagão carregado, tanto em reta como em curva, o truque COBRASMA apresenta também o menor valor, ficando o truque FNV com C-PEP em último lugar.

### 6.7 - Análise estatística comparativa do comportamento vertical

Para a análise do comportamento vertical utilizam-se as forças de apoio  $Q_1$  e  $Q_2$ . Foi escolhida a força  $Q_2$  para se processar a análise, por apresentar maiores variações dinâmicas do que  $Q_1$ , principalmente nas curvas onde a força  $Q_2$  era oriunda da roda guia.

#### 6.7.1 - Comportamento dinâmico em retas

Para o vagão vazio foram consideradas as velocidades de tráfego de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para as configurações U e P. A título ilustrativo encontram-se no Anexo II quatro curvas de distribuição de frequência da força de apoio  $Q_2$  e quatro curvas globais de comportamento dos valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  de  $Q_2$  em função da velocidade da composição. (Figs. 33 à 40 do Anexo II).

Através da aplicação do método de classificação de Kendall para as velocidades mais significativas, chega-se à tabela 6.11 que fornece a classificação global.

Tabela 6.11 - Classificação dos truques quanto ao comportamento vertical em reta para o vagão vazio.

| Velocidade<br>Truque                      | 70 km/h | 80 km/h | 90 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 3       | 4       | 4       | 11                               | 49                      |
| FNV com C-PEP                             | 2       | 2       | 3       | 7                                | 29                      |
| FNV sem C-PEP                             | 1       | 1       | 1       | 3                                | 19                      |
| LHB                                       | 4       | 3       | 2       | 9                                | 39                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 95%     | 95%     | 95%     | -                                | -                       |

Para o vagão carregado foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60 e 70 km/h para as configurações U e P da composição. Por processo análogo chega-se à tabela 6.12 que fornece a classificação global.

Tabela 6.12 - Classificação dos truques quanto ao comportamento vertical em reta para o vagão carregado.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 2       | 1       | 4                                | 19                      |
| FNV com C-PEP                             | 3       | 3       | 3       | 9                                | 39                      |
| FNV sem C-PEP                             | 2       | 1       | 2       | 5                                | 29                      |
| LHB                                       | 4       | 4       | 4       | 12                               | 49                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 95%     | 85%     | 95%     | -                                | -                       |



6.7.2 - Comportamento dinâmico em curvas

Para o vagão vazio foram consideradas as velocidades de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para as configurações U e P da composição. Através da aplicação do método de classificação de Kendall, chega-se à tabela 6.13 que fornece a classificação global.

Tabela 6.13 - Classificação dos truques quanto ao comportamento vertical em curvas para o vagão vazio.

| Velocidade<br>Truque                      | 70 km/h | 80 km/h | 90 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 3       | 4       | 4       | 11                               | 4º                      |
| FNV com C-PEP                             | 2       | 3       | 2       | 7                                | 2º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 1       | 1       | 1       | 3                                | 1º                      |
| LHB                                       | 4       | 2       | 3       | 9                                | 3º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 90%     | 95%     | 95%     | -                                | -                       |

A análise para o vagão carregado se processou nas velocidades de 50, 60 e 70 km/h nas configurações U e P da composição. Analogamente chega-se à tabela 6.14 que fornece a classificação global.

Tabela 6.14 - Classificação dos truques quanto ao comportamento vertical em curvas para o vagão carregado.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 1       | 1       | 3                                | 1º                      |
| FNV com C-PEP                             | 4       | 3       | 3       | 10                               | 3º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 2       | 2       | 2       | 6                                | 2º                      |
| LHB                                       | 3       | 4       | 4       | 11                               | 4º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 95%     | 85%     | 95%     | -                                | -                       |

Analogamente a avaliação dos truques quanto ao comportamento lateral, considerou-se também os valores  $X_{100\%}$  da grandeza  $Q_2$ . A tabela 6.15 apresenta os valores das amplitudes pico a pico de força  $Q_2$ .

Tabela 6.15 - Valores da amplitude pico a pico da força  $Q_2$ , em kN, para os truques.

| Trecho em Reta |           | TRUQUE   |             |             |       |
|----------------|-----------|----------|-------------|-------------|-------|
|                |           | COBRASMA | FNV c/C-PEP | FNV s/C-PEP | LHB   |
| Reta           | Vazio     | 46,5     | 37,0        | 37,0        | 43,5  |
|                | Carregado | 99,0     | 142,0       | 98,0        | 113,0 |
| Curva          | Vazio     | 37,0     | 34,0        | 32,0        | 37,0  |
|                | Carregado | 81,0     | 120,0       | 139,0       | 142,0 |

Analisando-se a tabela acima, constata-se que o truque FNV sem C-PEP para o vagão vazio, teve o melhor comportamento. Para o vagão carregado, os melhores resultados foram obtidos com o truque COBRASMA, sendo que os truques FNV e LHB tiveram o pior comportamento.

#### 6.8 - Análise estatística da segurança ao descarrilhamento

Para a análise estatística do fator de descarrilhamento (Y/Q) foi escolhido o trecho de reta 6-7 e a curva 24-25, levando-se em conta o trecho de entrada e saída da curva, a fim de verificar o efeito dinâmico desta influência.

##### 6.8.1 - Trecho em Reta

Para o vagão vazio foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para as configurações U e P da composição. As figuras 41 a 56 do Anexo II ilustram as curvas de distribuição estatística a 90 km/h. A tabela 6.16 mostra a classificação global.

Tabela 6.16 - Classificação dos truques quanto à segurança ao descarrilhamento para trecho em reta e vagão vazio.

| Velocidade<br>Truque                      | 70 km/h | 80 km/h | 90 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 1       | 1       | 3                                | 1º                      |
| FNV com C-PEP                             | 2       | 2       | 2       | 6                                | 2º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 3       | 4       | 4       | 11                               | 4º                      |
| LHB                                       | 4       | 3       | 3       | 10                               | 3º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 85%     | 90%     | 95%     | -                                | -                       |

Para o vagão carregado foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60 e 70 km/h nas configurações U e P da composição. Por procedimento análogo chega-se à tabela 6.17 que fornece a classificação global.

Tabela 6.17 - Classificação dos truques quanto à segurança ao descarrilhamento para o trecho em reta e vagão carregado.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 4       | 2       | 2       | 8                                | 3º                      |
| FNV com C-PEP                             | 1       | 1       | 3       | 5                                | 1º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 3       | 3       | 1       | 7                                | 2º                      |
| LHB                                       | 2       | 4       | 4       | 10                               | 4º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 85%     | 85%     | 95%     | -                                | -                       |

6.8.2 - Trecho em curva

Para o vagão vazio foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h nas configurações U e P da composição. A tabela 6.18 fornece a classificação global.

Tabela 6.18 - Classificação dos truques quanto à segurança ao descarrilhamento para o trecho em curva e vagão vazio.

| Velocidade<br>Truque                      | 70 km/h | 80 km/h | 90 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 1       | 4       | 6                                | 19                      |
| FNV com C-PEP                             | 3       | 2       | 2       | 7                                | 29                      |
| FNV sem C-PEP                             | 4       | 3       | 1       | 8                                | 39                      |
| LHB                                       | 2       | 4       | 3       | 9                                | 49                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 85%     | 85%     | 95%     | -                                | -                       |

Para o vagão carregado foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60 e 70 km/h nas configurações U e P da composição. A tabela 6.19 fornece a classificação global.

Tabela 6.19 - Classificação dos truques quanto à segurança ao descarrilhamento para o trecho em curva para o vagão carregado.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 2       | 2       | 4       | 8                                | 29                      |
| FNV com C-PEP                             | 1       | 1       | 1       | 3                                | 19                      |
| FNV sem C-PEP                             | 3       | 3       | 3       | 9                                | 39                      |
| LHB                                       | 4       | 4       | 2       | 10                               | 49                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 85%     | 90%     | 85%     | -                                | -                       |

Pela análise da tabela 6.4, a qual indica os valores máximos do fator  $Y/Q$ , constata-se que para a condição de vagão carregado, estes valores estão bem abaixo do limite de descarrilhamento ( $Y/Q = 1,2$ ). Para o vagão vazio em trecho reto, os truques FNV sem C-PEP e LHB apresentaram valores de picos elevados. Em curva, para todos os truques, os valores são aceitáveis e próximos entre si, não apresentando tendência a um possível descarrilhamento.

### 6.9 - Análise estatística da segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura

Para a análise estatística da segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura foi analisada a  $(\Sigma Y)_{2m}$  para o trecho de reta 6-7 e o trecho de curva 24-25, levando-se em conta o trecho de entrada e saída da curva.

#### 6.9.1 - Trecho em reta

Para o vagão vazio foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para as configurações U e P da composição. A tabela 6.20 mostra a classificação segundo Kendall para as velocidades mais significativas.

Tabela 6.20 - Classificação dos truques quanto à segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura para o trecho em reta para o vagão vazio.

| Velocidade<br>Truque                      | 70 km/h | 80 km/h | 90 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 3       | 3       | 1       | 7                                | 2º                      |
| FNV com C-PEP                             | 1       | 1       | 3       | 5                                | 1º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 2       | 4       | 4       | 10                               | 4º                      |
| LHB                                       | 4       | 2       | 2       | 8                                | 3º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 85%     | 85%     | 90%     | -                                | -                       |

Para o vagão carregado foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60 e 70 km/h nas configurações U e P da composição. A tabela 6.21 fornece a classificação global.

Tabela 6.21 - Classificação dos truques quanto à segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura para o trecho em reta para o vagão carregado.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 1       | 1       | 3                                | 19                      |
| FNV com C-PEP                             | 2       | 2       | 3       | 7                                | 29                      |
| FNV sem C-PEP                             | 3       | 3       | 2       | 8                                | 39                      |
| LHB                                       | 4       | 4       | 4       | 12                               | 49                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 85%     | 85%     | 95%     | -                                | -                       |

6.9.2 - Trecho em curva

Para o vagão vazio foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para as configurações U e P da composição. Pela aplicação do método de classificação segundo Kendall, chega-se à tabela 6.22.

Tabela 6.22 - Classificação dos truques quanto à segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura para o trecho em curva para o vagão vazio.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 4       | 4       | 4       | 12                               | 49                      |
| FNV com C-PEP                             | 1       | 1       | 1       | 3                                | 19                      |
| FNV sem C-PEP                             | 2       | 2       | 3       | 7                                | 29                      |
| LHB                                       | 3       | 3       | 2       | 8                                | 39                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 95%     | 95%     | 85%     | -                                | -                       |

Para o vagão carregado foram analisadas as velocidades de 40, 50, 60 e 70 km/h para as configurações U e P da composição. A tabela 6.23 fornece o resultado da análise segundo Kendall.

Tabela 6.23 - Classificação dos truques quanto à segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura para o trecho em curva para o vagão carregado.

| Velocidade<br>Truque                      | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h | Somatória<br>da<br>Classificação | Classificação<br>Global |
|---|---------|---------|---------|----------------------------------|-------------------------|
| COBRASMA                                  | 1       | 1       | 1       | 3                                | 1º                      |
| FNV com C-PEP                             | 4       | 2       | 4       | 10                               | 4º                      |
| FNV sem C-PEP                             | 2       | 3       | 3       | 8                                | 2º                      |
| LHB                                       | 3       | 4       | 2       | 9                                | 3º                      |
| Critério de<br>Significância<br>ACEITÁVEL | 95%     | 95%     | 95%     | -                                | -                       |

Quanto aos valores da grandeza  $X_{100\%}$  para  $(\Sigma Y)_{2m}$ , constata-se pela análise da tabela 6.5, que estes valores estão bem abaixo dos valores limites citados no item 5.5.

#### 6.10- Análise estatística comparativa, conjunta dos quatro truques

Para melhor visualização da análise estatística comparativa dos truques, através do Método de Kendall, abordada nos itens 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9, é apresentada a tabela conjunto 6.24. Na mesma constata-se que o truque LHB, em geral, apresentou a pior colocação.

Quanto aos demais truques, a tabela 6.24 mostra que, para cada situação, a classificação é variável. Porém pode-se notar que o truque COBRASMA, com vagão carregado, obteve o primeiro lugar, exceto quanto à segurança ao descarrilhamento. Para o truque FNV com C-PEP, em vazio, a sua colocação foi em primeiro ou segundo lugar.

Tabela 6.24 - Resultado da análise comparativa do método de Kendall, para os quatro truques.

| CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO         |                                | TRUQUE   |               |               |    | LHB |
|-------------------------------|--------------------------------|----------|---------------|---------------|----|-----|
|                               |                                | COBRASMA | FNV com C-PEP | FNV sem C-PEP |    |     |
| Comportamento Lateral         | Trecho em Reto                 | 29       | 19            | 39            | 49 |     |
|                               | vagão vazio<br>vagão carregado | 19       | 39            | 29            | 49 |     |
| Comportamento Vertical        | Trecho em Curva                | 39       | 19            | 29            | 49 |     |
|                               | vagão vazio<br>vagão carregado | 19       | 39            | 29            | 39 |     |
| Segurança ao Descarrilhamento | Trecho em Reto                 | 49       | 29            | 19            | 39 |     |
|                               | vagão vazio<br>vagão carregado | 19       | 39            | 29            | 49 |     |
| Carregamento Lateral da Via   | Trecho em Curva                | 19       | 29            | 39            | 49 |     |
|                               | vagão vazio<br>vagão carregado | 29       | 19            | 39            | 49 |     |
|                               | Trecho em Reto                 | 29       | 19            | 49            | 39 |     |
|                               | vagão vazio<br>vagão carregado | 19       | 29            | 39            | 49 |     |
|                               | Trecho em Curva                | 49       | 19            | 29            | 39 |     |
|                               | vagão vazio<br>vagão carregado | 19       | 49            | 29            | 39 |     |



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas primeiramente as conclusões da análise dos fatores característicos de avaliação dos truques e a qualificação dos mesmos. Em seguida serão apresentadas sugestões quanto à melhoria dos truques, assim como considerações sobre o desenvolvimento deste trabalho. Serão apresentadas também, sugestões para o prosseguimento da técnica de avaliação.

#### 7.1 - Avaliação dos truques ensaiados

##### 7.1.1 - Comportamento lateral

Foram abordados os seguintes parâmetros: análise estatística comparativa, movimento de auto-excitação e observação visual.

Na análise estatística comparativa foi desenvolvido o método de classificação de Kendall. A tabela 6.24 apresenta os resultados da análise conjunta, a qual mostra que para o vagão vazio, tanto em reta como em curva, o truque FNV com C-PEP teve o primeiro lugar. Já para o vagão carregado, o truque COBRASMA obteve melhor classificação, ficando o truque LHB no último lugar, tanto carregado como em vazio. Com relação aos valores de amplitude "pico a pico" da somatória  $\Sigma Y$ , a tabela 6.10 mostra que, para o vagão vazio em reta, o truque COBRASMA apresenta os menores efeitos dinâmicos. Já para o vagão vazio em curva, o truque FNV com C-PEP tem o seu primeiro lugar. Quanto à análise para o vagão carregado, tanto em reta como em curva, o truque COBRASMA apresenta também menores valores, ficando o truque FNV com C-PEP em último lugar. Por outro lado, observando-se a figura 11 do Anexo II, a qual apresenta as curvas globais de comportamento da  $\Sigma Y$  em função da velocidade da composição, para o truque FNV sem C-PEP, com vagão vazio em reta, constata-se que o feixe de curvas é praticamente homogêneo em sua totalidade, indicando que os valores de pico ( $X_{100\%}$ ) não são unicamente devido a perturbação da via, mas sim do truque. Além disso o feixe de curvas alarga-se

rapidamente para este truque, quando em alta velocidade. Isto representa uma oscilação lateral acentuada, ocasionando pancadas do friso das rodas com o trilho. Com relação às figuras 9, 10 e 12 do Anexo II, verifica-se que nos truques COBRASMA, FNV com C-PEP e LHB, não existe uma tendência acentuada de alargamento do feixe de curvas. Observa-se também na figura 10 que o truque FNV com C-PEP apresenta um bom comportamento.

Com relação ao movimento de auto-excitação do rodeiro, foi verificado (Tabela 6.5) que os truques COBRASMA, FNV com C-PEP e LHB têm comprimento de onda próximo a de um rodeiro livre, o que não acontece com o truque FNV sem C-PEP, que apresentou progressiva diminuição do comprimento de onda, com o aumento da velocidade de tráfego, comprometendo sua estabilidade. Pela análise dos registros das forças de guia da  $\Sigma Y$  (Figs. 6.2 a 6.7), chega-se ao quadro conclusivo.

Quadro conclusivo sobre a estabilidade dinâmica dos truques

|               |           |   |
|---------------|-----------|---|
| COBRASMA      | vazio     | estável até 90 km/h   |
|               | carregado | estável até 70 km/h   |
| FNV com C-PEP | vazio     | estável até 90 km/h   |
|               | carregado | estável até 70 km/h   |
| FNV sem C-PEP | vazio     | início da instabilidade a 70 km/h, não permitindo o tráfego até a velocidade máxima de teste de 90 km/h |
|               | carregado | início da instabilidade na velocidade máxima de teste de 70 km/h  |
| LHB           | vazio     | início da instabilidade a 70 km/h, não permitindo o tráfego até a velocidade máxima de teste de 90 km/h |
|               | carregado | estável até 70 km/h   |

Referindo-se às observações visuais, mencionadas no item 6.6, apresenta-se o quadro conclusivo abaixo.

Quadro conclusivo sobre as observações visuais.

|               |  |
|---------------|--|
| COBRASMA      | Não mostraram ocorrências de pancadas, assim como movimentos laterais acentuados do rodeiro.   |
| FNV com C-PEP |  |
| FNV sem C-PEP | Para velocidades acima de 70 km/h, observam-se movimentos, oscilatórios rotativos das laterais e acentuados do rodeiro   |
| LHB           | Para velocidades acima de 70 km/h, observam-se movimentos laterais acentuados do rodeiro, além de pancadas constantes da caixa de rolamento com o quadro do truque, provocando amassamentos. Este comportamento foi observado tanto para os rodeiros com perfis de roda cônico, como também com os perfis ORE-1002, sendo que neste último caso as ocorrências foram mais acentuadas |

### 7.1.2 - Comportamento vertical

Foi analisada a componente vertical da força de contato roda/trilho, deduzida da parte estática devido ao peso próprio do veículo. A tabela 6.4 mostra a classificação dos truques segundo o Método de Kendall. Nesta tabela verifica-se que o truque FNV sem C-PEP apresenta o melhor comportamento para o vagão vazio, tanto em reta como em curva. O truque COBRASMA, para o vagão vazio, obteve a pior classificação, enquanto que para o vagão carregado, obteve o primeiro lugar. O truque LHB, para o vagão carregado, tanto em reta como em curva, obteve o 4º lugar. Com relação aos valores de amplitude "pico a pico" da força  $Q_2$ , a tabela 6.15 mostra que, para o truque FNV sem C-PEP, o comportamento foi o melhor. Para o vagão carregado, os melhores valores foram obtidos pelo truque COBRASMA, sendo que os truques FNV e LHB tiveram o pior comportamento.

### 7.1.3 - Segurança ao descarrilhamento

Para a análise da segurança ao descarrilhamento utilizou-se o fator  $Y/Q$ . Conforme considerações teóricas, abordadas anteriormente, este fator não deve ultrapassar o valor 1,2, a fim

de que não haja possibilidade de descarrilhamento. Os valores máximos obtidos encontram-se na tabela 6.4, e de acordo com o comentário da página 117, os truques FNV sem C-PEP e LHB apresentaram valores elevados, indicando uma tendência a um possível descarrilhamento.

Quanto à análise comparativa, a tabela 6.24 apresenta a classificação global pelo método de Kendall. Os truques LHB e FNV sem C-PEP apresentaram o pior comportamento.

#### 7.1.4 - Segurança ao deslocamento transversal da superestrutura

Para esta análise foi utilizado o critério de Prud'Homme, o qual estabelece o limite da somatória  $(\Sigma Y)_{2m}$ , que foi determinado no item 5.5, que para o vagão vazio é aproximadamente 24 kN para os truques e para o vagão carregado 91,9 kN.

Os valores máximos atingidos, constantes na tabela 6.5, estão bem abaixo dos limites acima citados. Desta forma, segundo este critério, todos os truques testados apresentaram bons resultados.

Quanto à análise comparativa de classificação segundo Kendall, a tabela 6.24 apresenta os resultados.

#### 7.1.5 - Resultados da avaliação

De acordo com o exposto nos itens anteriores, conclui-se que os truques FNV sem C-PEP e LHB não atendem às exigências técnicas necessárias, não sendo recomendado o seu emprego na Estrada de Ferro Carajás. Quanto aos truques COBRASMA e FNV com C-PEP, apesar de não serem otimizados para todas as condições analisadas, a sua utilização não compromete a operação em Carajás.

### 7.2 - Sugestões para melhoria dos truques

#### Truque COBRASMA

Conforme constatado anteriormente, quanto ao comportamento vertical, este truque apresentou bons resultados para o vagão carregado, o mesmo não ocorrendo em vazio. Isto é devido

ao seu amortecimento vertical não depender da posição da suspensão.

Como sugestão deveria ser utilizado um sistema de suspensão com dupla mola da cunha, (Fig. 7.1), o qual possibilitaria também a mesma frequência de ressonância do sistema, para as condições vagão carregado e vazio.

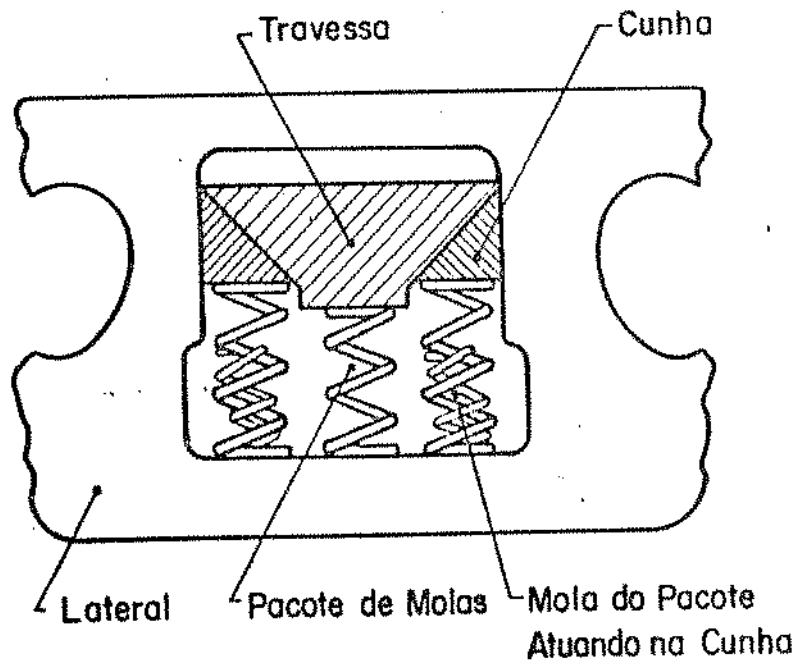


Figura 7.1 - Sugestão do sistema de suspensão vertical.

Quanto ao comportamento lateral para o vagão carregado, o truque apresentou bons resultados, o mesmo não acontecendo em vazio. Seria recomendável um estudo de otimização do sistema de "ampara-balanço de apoio constante" (Fig. 3.4 b) e uma possível diminuição da largura da cunha de atrito (Fig. 3.3).

#### Truque FNV com C-PEP

Para o comportamento vertical, os resultados não foram completamente satisfatórios, tanto para o vagão vazio como carregado. Porém a concepção apresentada ao sistema de amortecimento dependente da carga (Fig. 3.6), é uma solução mais adequada, que o sistema de amortecimento constante (Fig. 3.2). Sugere-se uma otimização deste sistema, como por exemplo o indicado na figura 7.1. Com respeito ao C-PEP (Fig. 3.8), este provocou um aumento do

efeito dinâmico nas forças verticais, devido ao aumento excessivo da rigidez ao balanço do vagão.

Quanto ao comportamento lateral, o C-PEP atuou de forma positiva com o vagão vazio, porém os resultados não foram completamente satisfatórios com o vagão carregado. Para tanto, sugere-se uma otimização do sistema C-PEP, tanto para o comportamento lateral como vertical.

Estas sugestões foram apresentadas por nós, durante uma exposição deste trabalho em São Luiz do Maranhão, quando compareceram a direção técnica de Operação Carajás e as empresas fabricantes dos truques. Tendo em vista que aprovamos dois truques, COBRASMA e FNV com C-PEP, a Companhia Vale do Rio Doce encomendou de cada fabricante a quantia de 1440 do previsto de 2880 truques para a primeira fase de operação. Devido aos prazos restritos de entrega do material, não foi possível nesta fase a introdução de modificações nos truques. Para as próximas entregas, serão estudadas, juntamente com os fabricantes, as modificações por nós sugeridas.

### 7.3 - Considerações sobre o desenvolvimento deste trabalho

O Capítulo 2 abordou a escolha de trechos da linha da RFFSA, com características próximas à Estrada de Ferro Carajás, tendo em vista que esta ainda se encontrava em construção. Foi realizado um grande número de viagens, para permitir uma significativa coleta de dados nas diferentes condições de operação. A análise das medições se processou nos trechos mais representativos, após um estudo prévio dos registros. Nestes trechos foi processada toda a avaliação do comportamento dos truques, em diferentes condições de serviço.

O Capítulo 3 tratou das informações necessárias ao desenvolvimento deste trabalho, tais sejam: características sobre os truques testados, sua instrumentação no Centro de Tecnologia da UNICAMP, construção do carro de medição e procedimento de medição com o rodeiro instrumentado. Esta técnica segue a metodologia utilizada atualmente pelas principais ferrovias européias. Estão sendo fornecidos pela Ferrovia Alemã, rodeiros instrumentados para diferentes países, inclusive os Estados Unidos da América do Nor

te.

No Capítulo 4 encontra-se a técnica utilizada nas viagens de medição, incluindo a montagem da composição para as medições, instalação de equipamentos medida e registro, assim como as condições de operação.

O Capítulo 5 trata do procedimento de avaliação dos truques. Inicialmente foram apresentadas considerações gerais com aspectos teóricos sobre diversos fatores analisados para avaliação dos truques, tais sejam: comportamento lateral, comportamento vertical, segurança ao descarrilhamento, segurança ao deslocamento transversal da super-estrutura e observação visual. Neste capítulo foram determinados os valores limites do fator de descarrilhamento, como também os valores limites da somatória das forças laterais, a fim de garantir estabilidade lateral da super-estrutura. Foi analisado também o movimento de auto-excitação do rodeiro. Para uma qualificação comparativa entre os truques, foi empregado o método estatístico de análise de Kendall. Consta também neste capítulo o procedimento de análise através do Computador do Centro de Tecnologia.

Dos fatores de avaliação utilizados neste trabalho, alguns são também empregados pela Ferrovia Alemã, outros foram baseados em estudos e reuniões com especialistas alemães, tanto da própria ferrovia, como também das Universidades de Hannover e Munique.

Estes fatores de avaliação utilizados permitiram a avaliação dos truques testados. Foi possível selecionar quais os truques que estariam em condições para o tráfego na Ferrovia Carajás, assim como sugerir à CVRD as modificações necessárias para a sua melhoria.

No Capítulo 6 encontram-se os resultados da análise de medições, segundo a técnica apresentada no Capítulo 5.

O registro das forças entre roda e trilho, permitiram a elaboração de um programa de carga, através da matriz de Markov, para os ensaios de fadiga dos truques COBRASMA e FNV, no laboratório do Centro de Tecnologia da UNICAMP. Este procedimento de ensaio possibilitou testar cada truque, de acordo com suas solicita

ções individuais, para uma vida de 30 anos.

As medições das tensões da estrutura dos truques, apresentadas no Capítulo 3, permitiram a avaliação da resistência do truque, durante as viagens, bem como o acompanhamento das solicitações nos testes de resistência à fadiga em laboratório.

Conforme mencionado no Capítulo 6 o perfil da roda tem grande influência na estabilidade do veículo. Por outro lado, a geometria da banda de rolamento deverá permanecer a mesma no decorrer do desgaste, permitindo também uma economia quanto ao número de reperfilamento da roda. Este assunto já está sendo estudado conjuntamente com a CVRD.

#### 7.4 - Sugestões para trabalhos futuros

Os movimentos relativos e as acelerações dos componentes dos truques, inclusive rodeiro, medidos durante as viagens, permitirão a realização de um estudo de correlação com as forças entre roda e trilho, para uma melhor avaliação, quanto à otimização do projeto.

Um fator também importante para a avaliação do truque, é o desgaste da roda e do trilho. Dentre as grandezas responsáveis pelo desgaste, destacam-se a força entre roda e trilho e os deslocamentos laterais e angular do rodeiro em relação ao trilho. Estas forças são determinadas com relativa facilidade através do rodeiro instrumentado, porém a medição dos deslocamentos é uma tarefa mais difícil. Para tanto, sugere-se a medição através de um sistema inercial com raios LASER.



A N E X O I

### I.1 - Relação do equipamento de análise utilizado

- Computador HP 9836 com 0,86 M Bytes (com Microprocessador Motorola M 68000/Linguagem Basic 2.0 HP)
- 2 acionadores de mini-discos flexíveis  $\phi$  5,25 (dupla/dupla)
- 200 disquetes com 270 k Bytes cada
- Unidade de disco rígido (Winchester) - HP 9134 A com 4,6 M Bytes
- Voltímetro HP 3437 A
- Plotador HP 7470 A
- Impressora matricial HP 82905 B
- Fontes de tensão estabilizada
- Voltímetro
- Osciloscópio
- Freqüencímetro
- Registrador de fita magnética de 14 canais
- 14 filtros passa-baixa
- Somadora analógica
- Diversos analógicos

### I.2 - Codificação utilizada

Em face da enorme quantidade de dados e resultados foi elaborada uma codificação que está presente em todo o trabalho:

Código Padrão: ABBBCDDEEF

Onde:

A - refere-se ao truque e é igual a:

C - COBRASMA carregado

c - COBRASMA vazio

F - FNV carregado

f - FNV vazio

L - LHB carregado

l - LHB vazio

BBB - refere-se ao nº da viagem realizada. Estes dígitos são omitidos quando se trata de curvas globais em função da velocidade.

C - refere-se ao posicionamento do truque instrumentado em relação à composição e é igual à:

P - rodeiro na cabeça da composição (Fig. 4.5)

U - rodeiro na cauda da composição (Fig. 4.5)

DD - refere-se ao nº da placa que dá início ao sub-trechos analisado. Estes dígitos são omitidos quando se trata de uma soma de sub-trechos.

EE - refere-se à grandeza analisada e é igual à:

SY - somatória das forças de guia

$Y_1$  - força de guia na roda 1

$Y_2$  - força de guia na roda 2

$Q_1$  - força de apoio na roda 1

$Q_2$  - força de apoio na roda 2

1Q - fator de descarrilhamento da roda 1

2Q - fator de descarrilhamento da roda 2

F - refere-se à rotina de cálculo e é igual à:

2 - método do valor limite II

m - método de  $2m$  de atuação (Prud'Homme)

r - soma das retas de uma viagem

s - soma das curvas de uma viagem

a ausência do código F indica tratar-se de um arquivo de dados.

### I.3 - Programas elaborados

Basicamente foi elaborado um programa principal, que gerencia os dados de todos os outros sub-programas.

#### Sub-Programa 1

Controla os fluxos de dados da fita magnética para a memória do computador, através do digitalizador, segundo parâmetros introduzidos no programa principal.

#### Sub-Programa 2

Método do valor limite II - Elabora a distribuição estatística por classe, dos valores de picos positivos e negativos.

#### Sub-Programa 3

Método do valor limite III - Constroe a distribuição estatística para a somatória das forças de guia que atua em 2(dois) metros de via (Prud'Homme).

#### Sub-Programa 4

Método de classificação de eventos, segundo o procedimento de Kendall.

#### Sub-Programa 5

Para impressão de resultados e gráficos.

A N E X O    I I

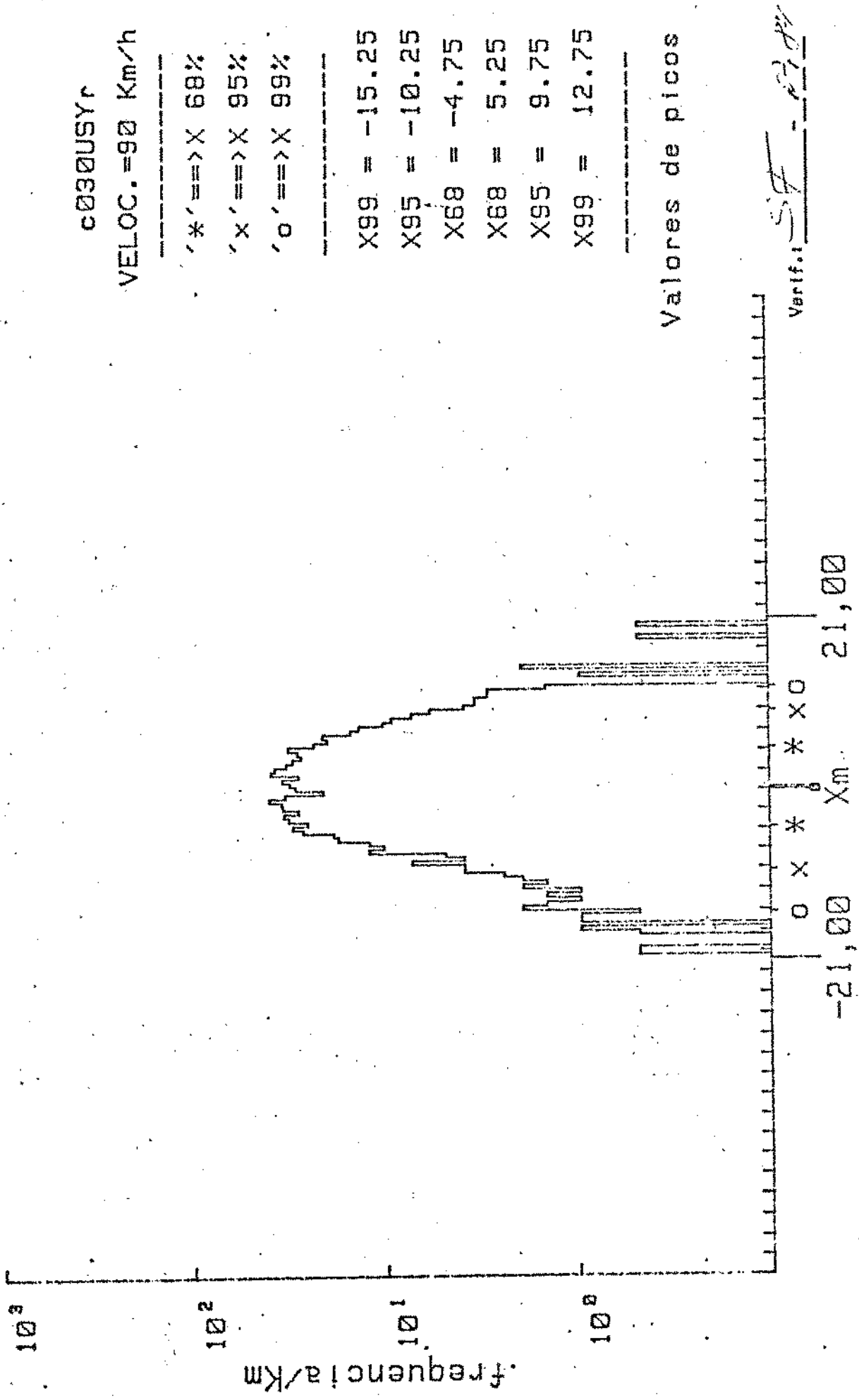


Figura 1 - Curva de distribuição de frequência da SY para o trecho COBRASMA Vagão Vazio - Configuração U - Trecho em Reta

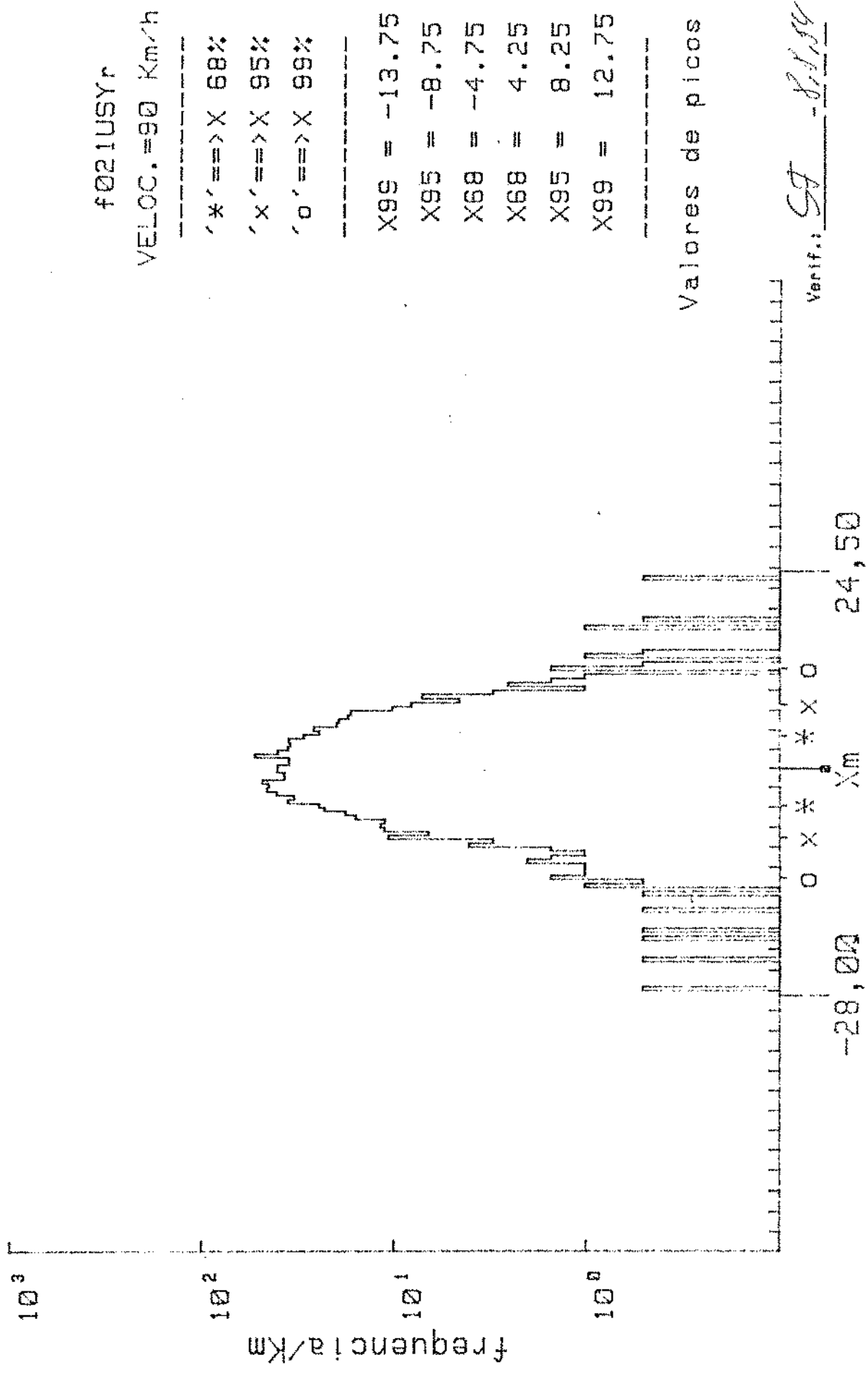


Figura 2 - Curva de distribuição de frequência da SY para o truque FNY com C-PEP  
 Vagão Vazio - Configuração U - Trecho em Reta

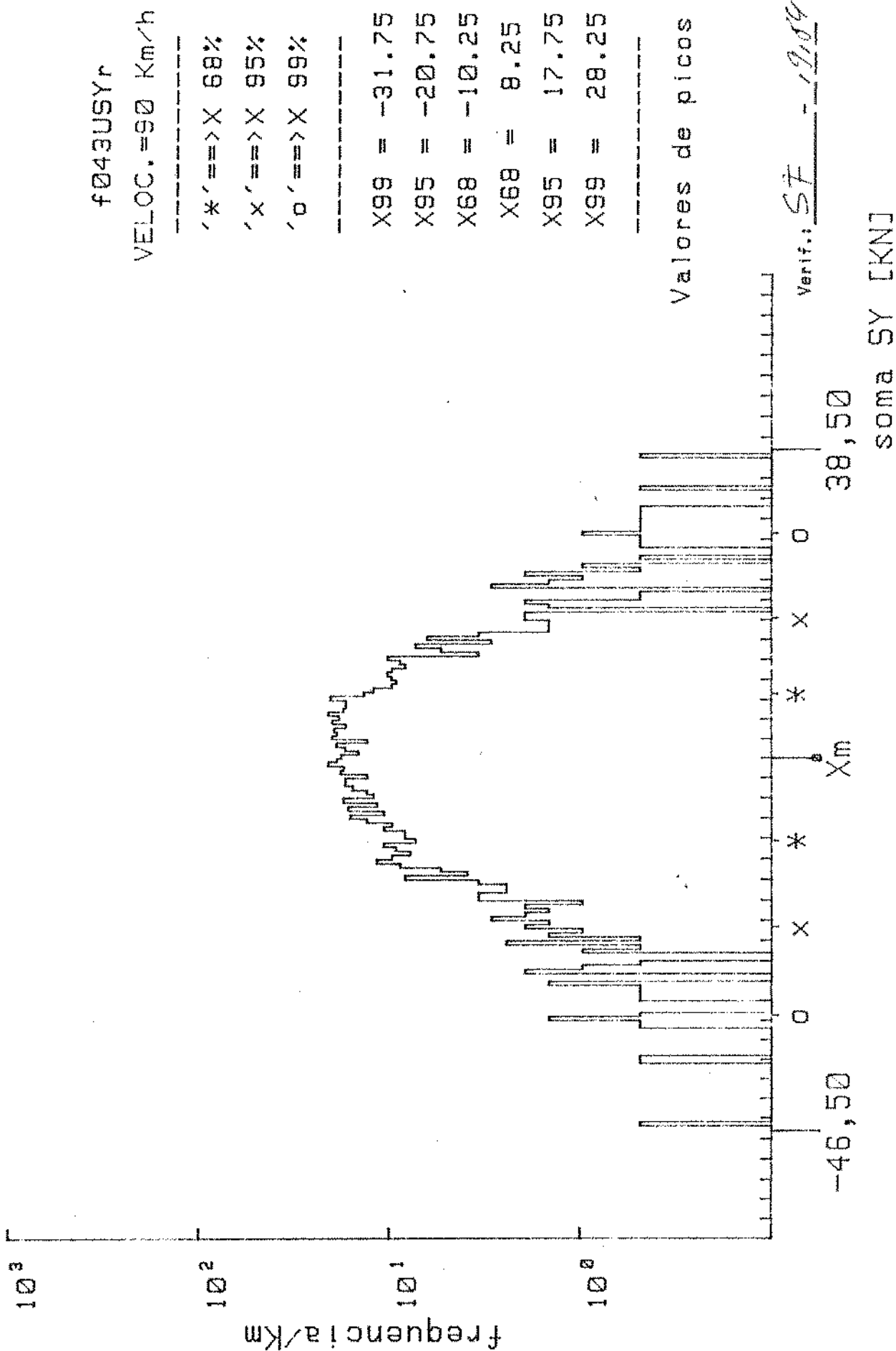


Figura 3 - Curva de distribuição de frequência da SY para o trecho FNV sem C-PEP Vagão Vazio - Configuração U - Trecho em Reta





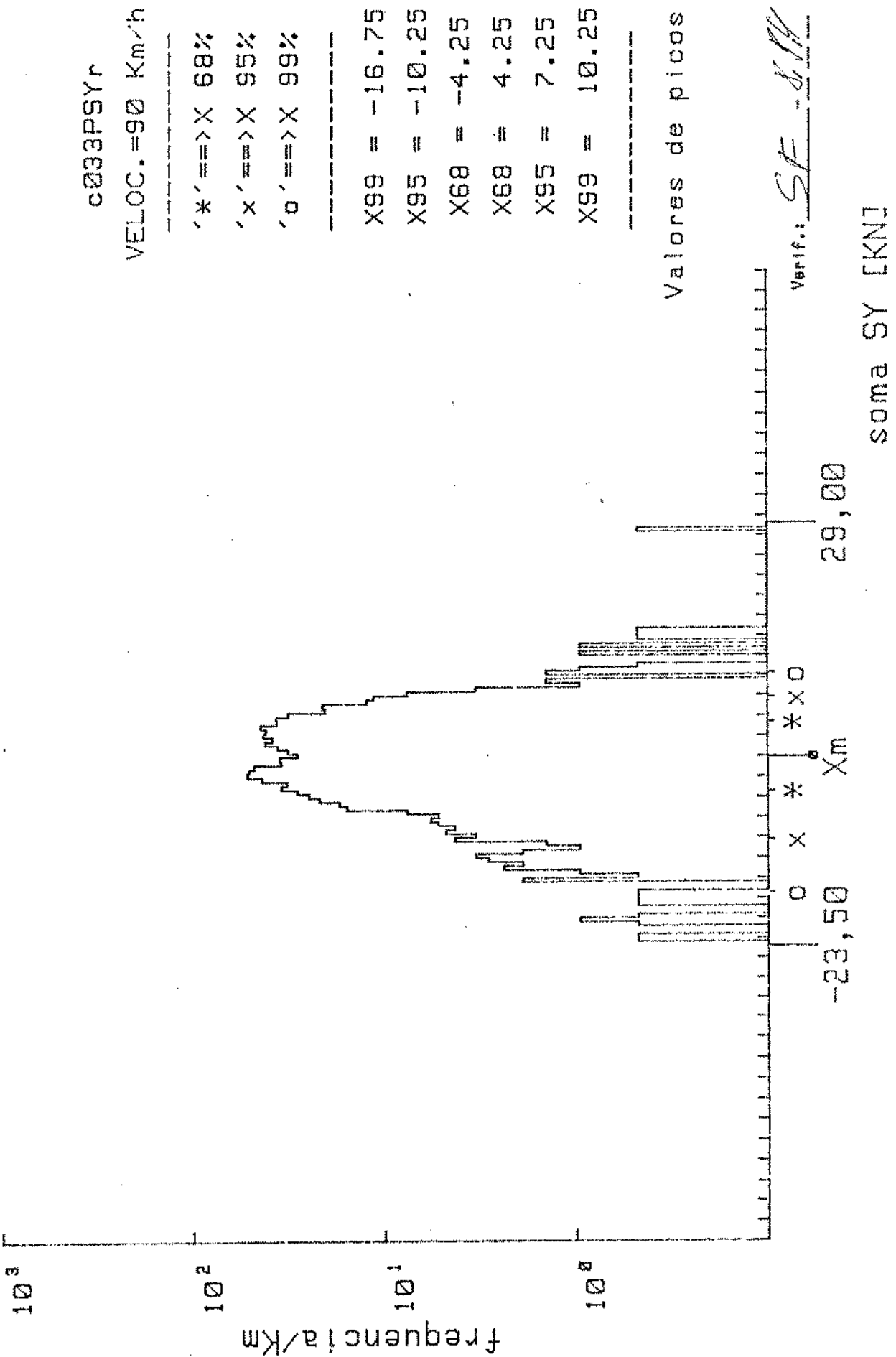


Figura 5 - Curva de distribuição de frequência da  $\Sigma Y$  para o trecho COBRASMA Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta

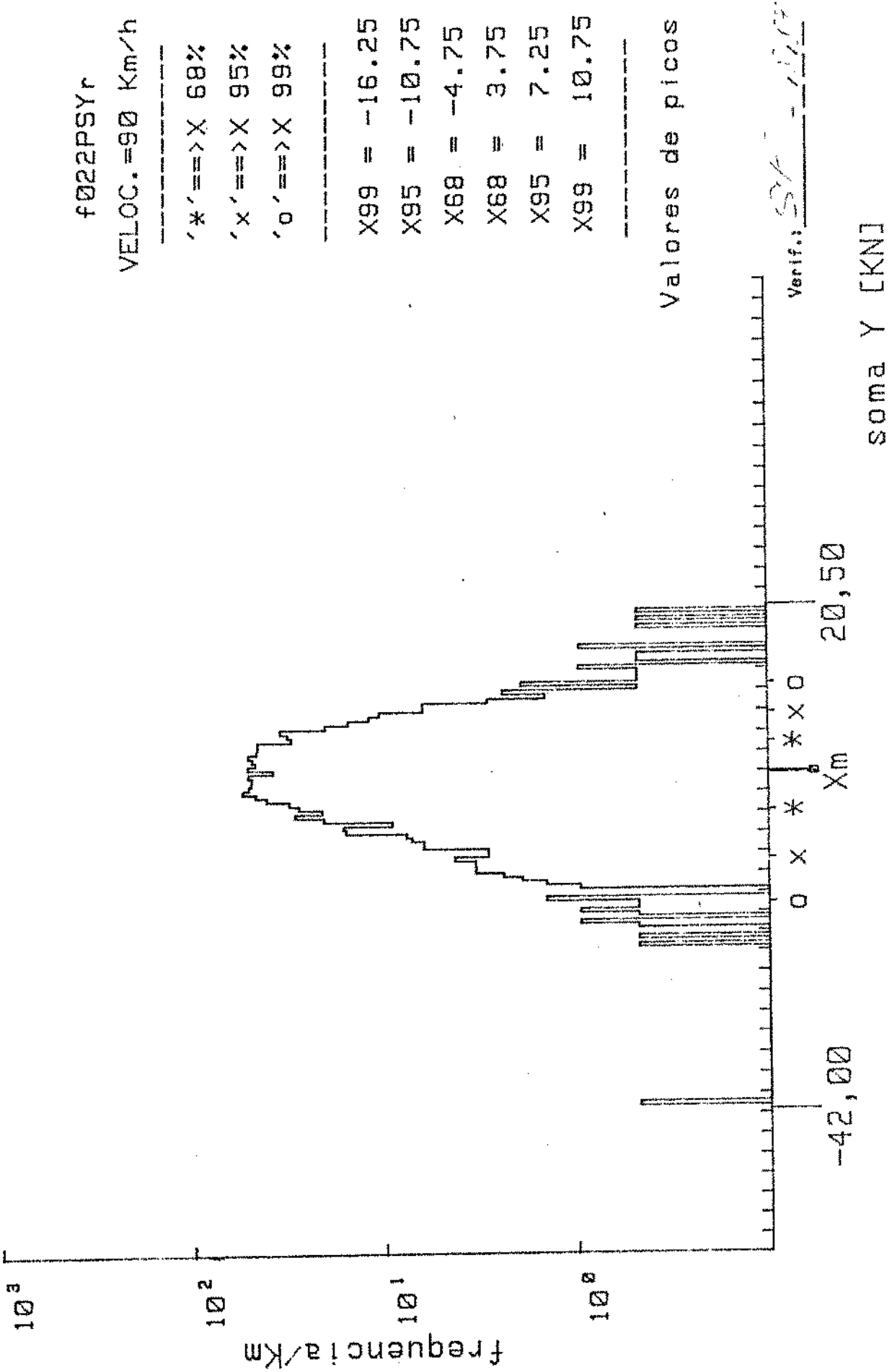


Figura 6 - Curva de distribuição de frequência da ΣY para o truque FNV com C-PEP Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta

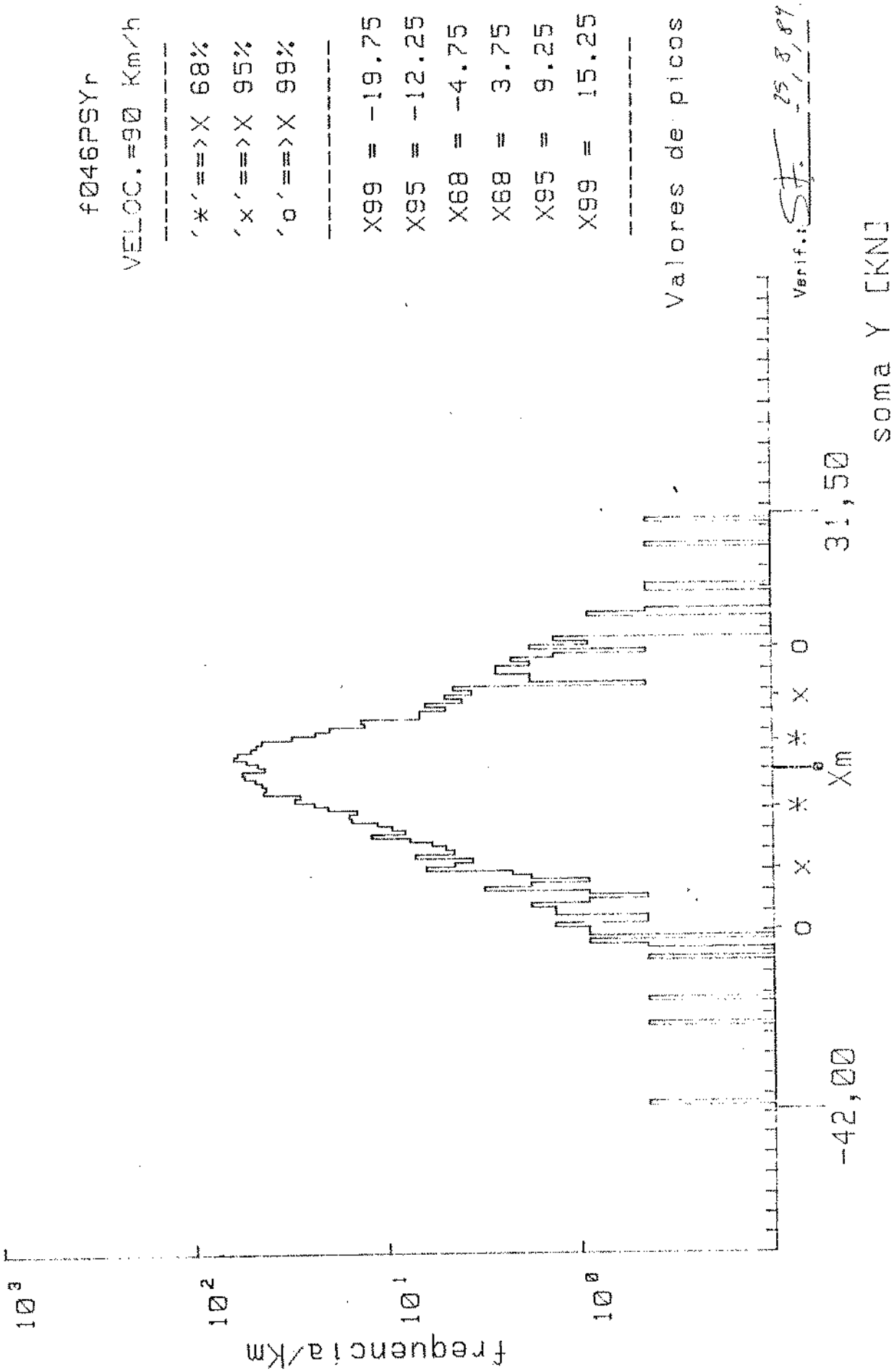


Figura 7 - Curva de distribuição de frequência da ΣY para o truque FNV sem C-PEP Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta

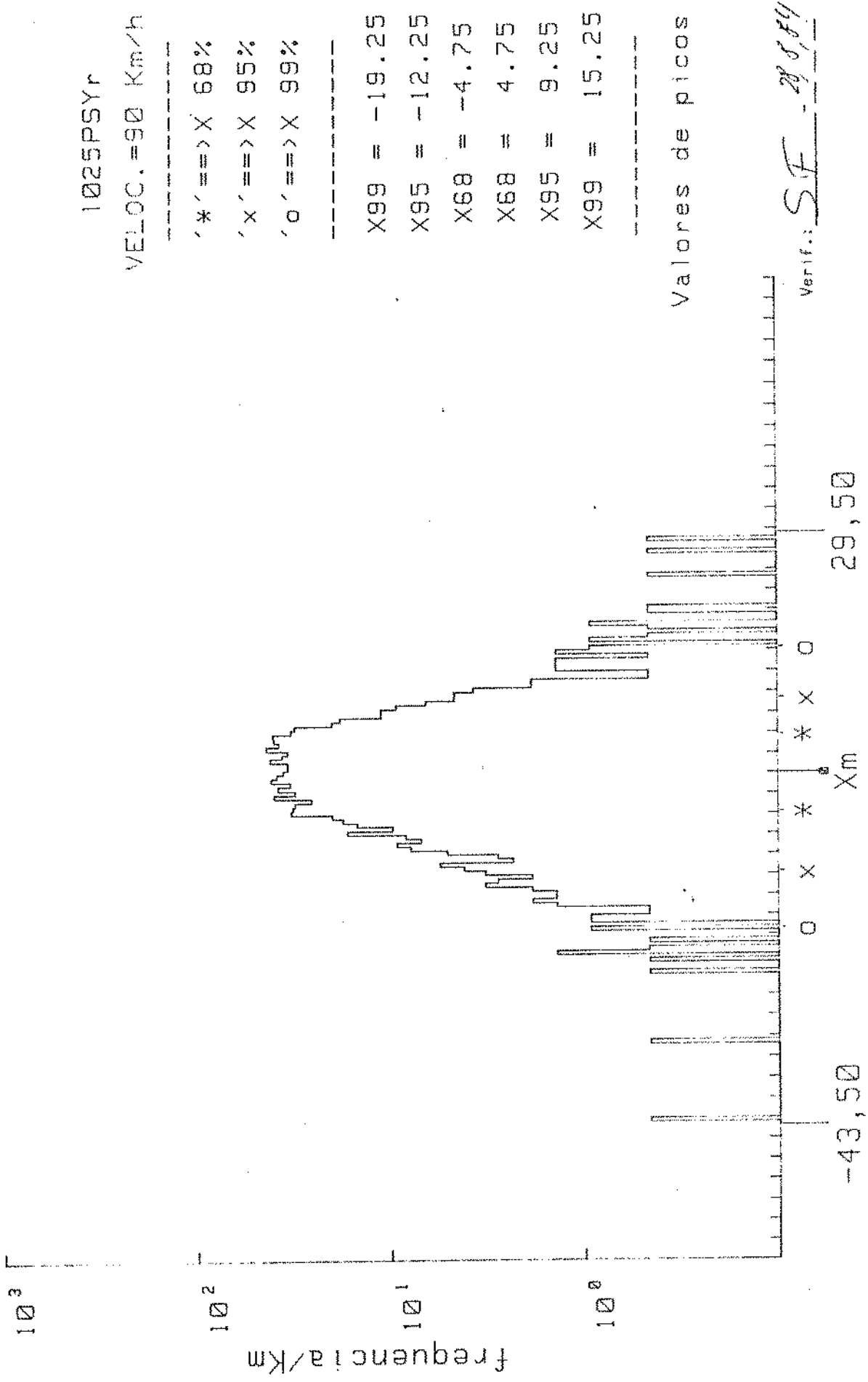
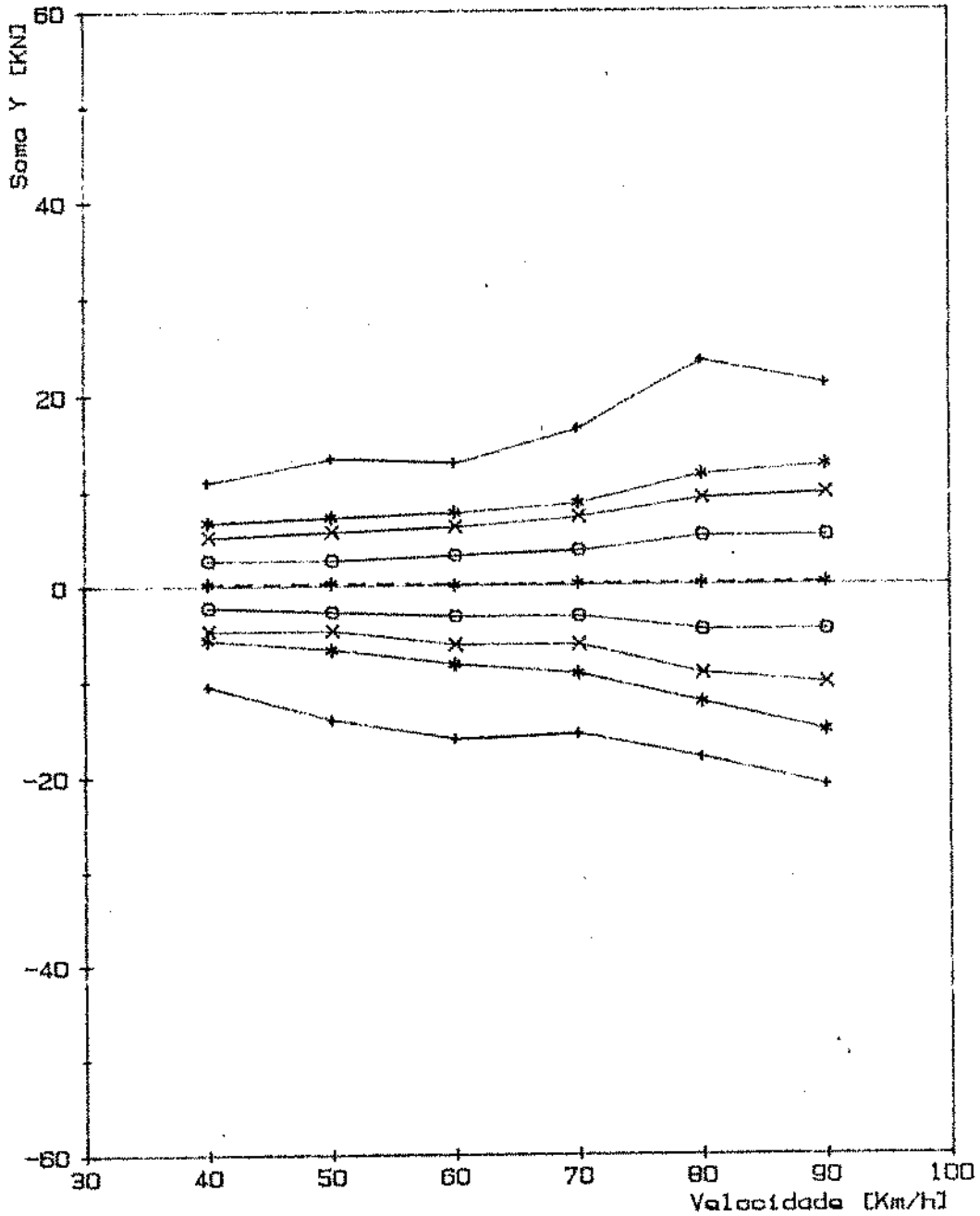


Figura 8 - Curva de distribuição de frequência da ΣY para o truque LHB Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: cUSYr  
Truque : cob- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

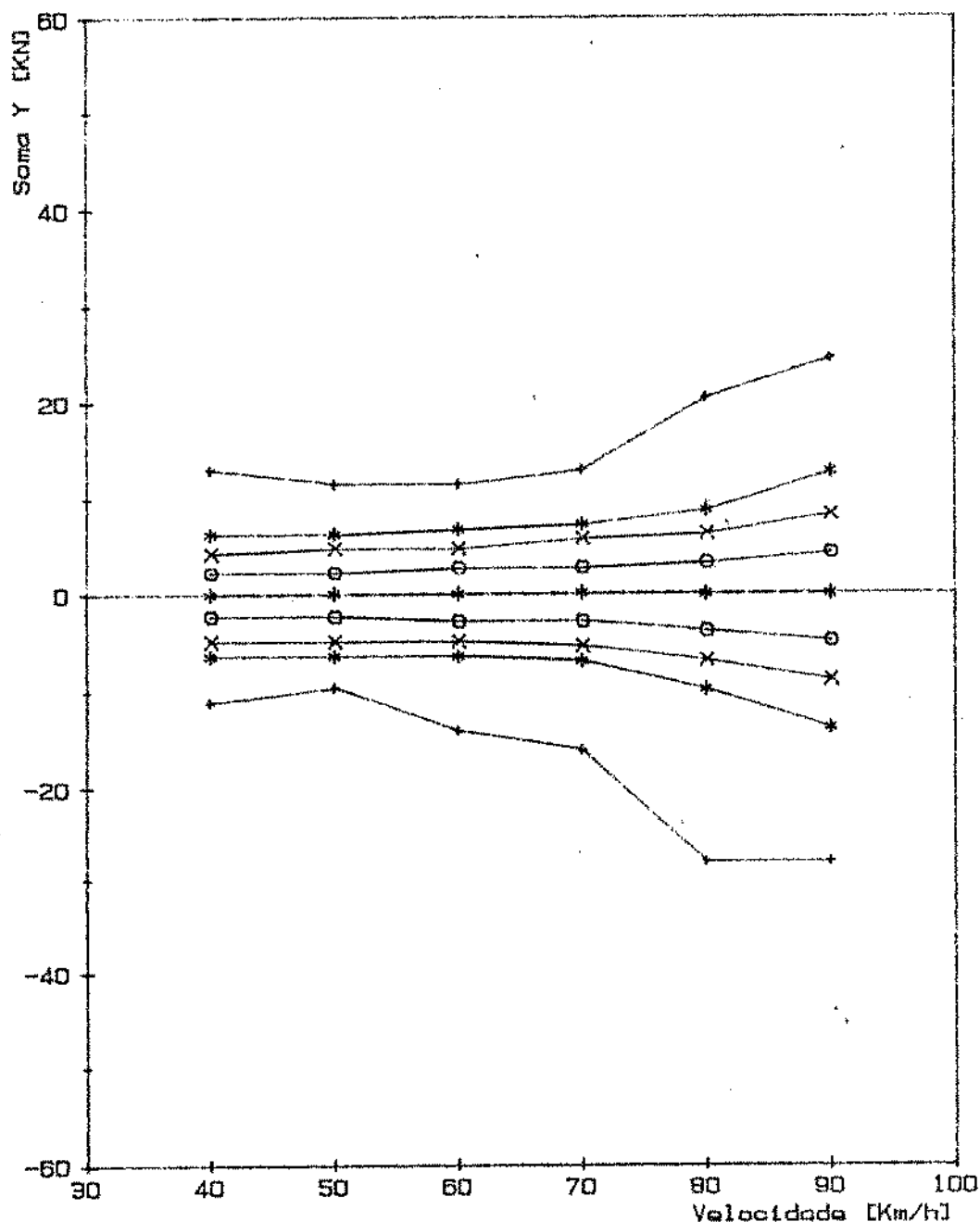
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 27 P. 84

Figura 9 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque COBRASMA - Vagão Vazio - Con<sub>u</sub>figurac<sub>o</sub> U. - Trecho em Reta.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: fUSYr  
Truque : fnvo- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

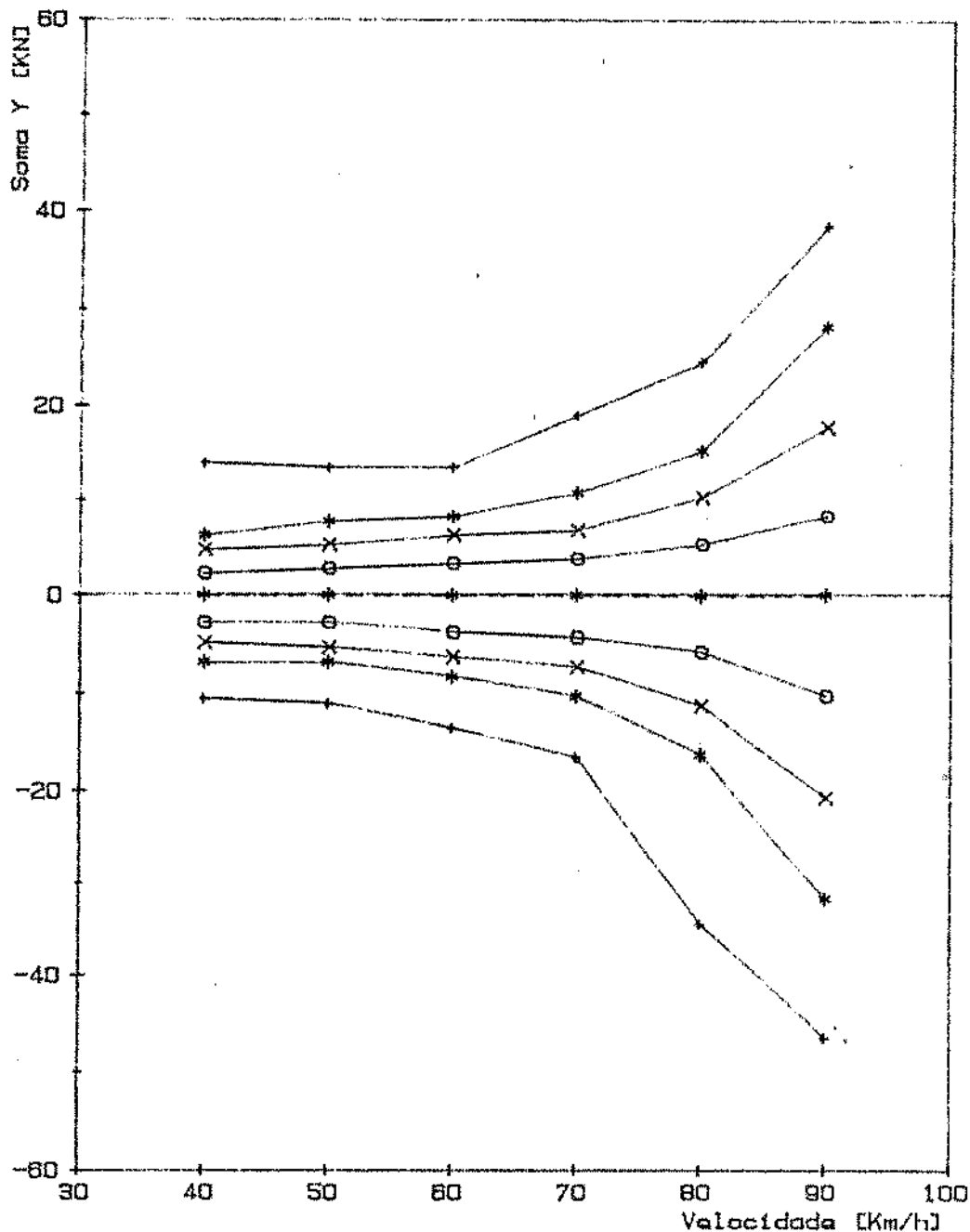
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + + + + + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* \* \* \* \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x x x x x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o o o o o LIMITE P/ 88% DOS VALORES

Verif. SF 25.8.84

Figura 10 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV com C-PEP - Vagão Vazio-Configuração U.- Trecho em Retra

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: fUSYr  
Truque : fnvs- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

- \*--- VALOR MEDIO
- ▲— LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \*— LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x— LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o— LIMITE P/ 88% DOS VALORES

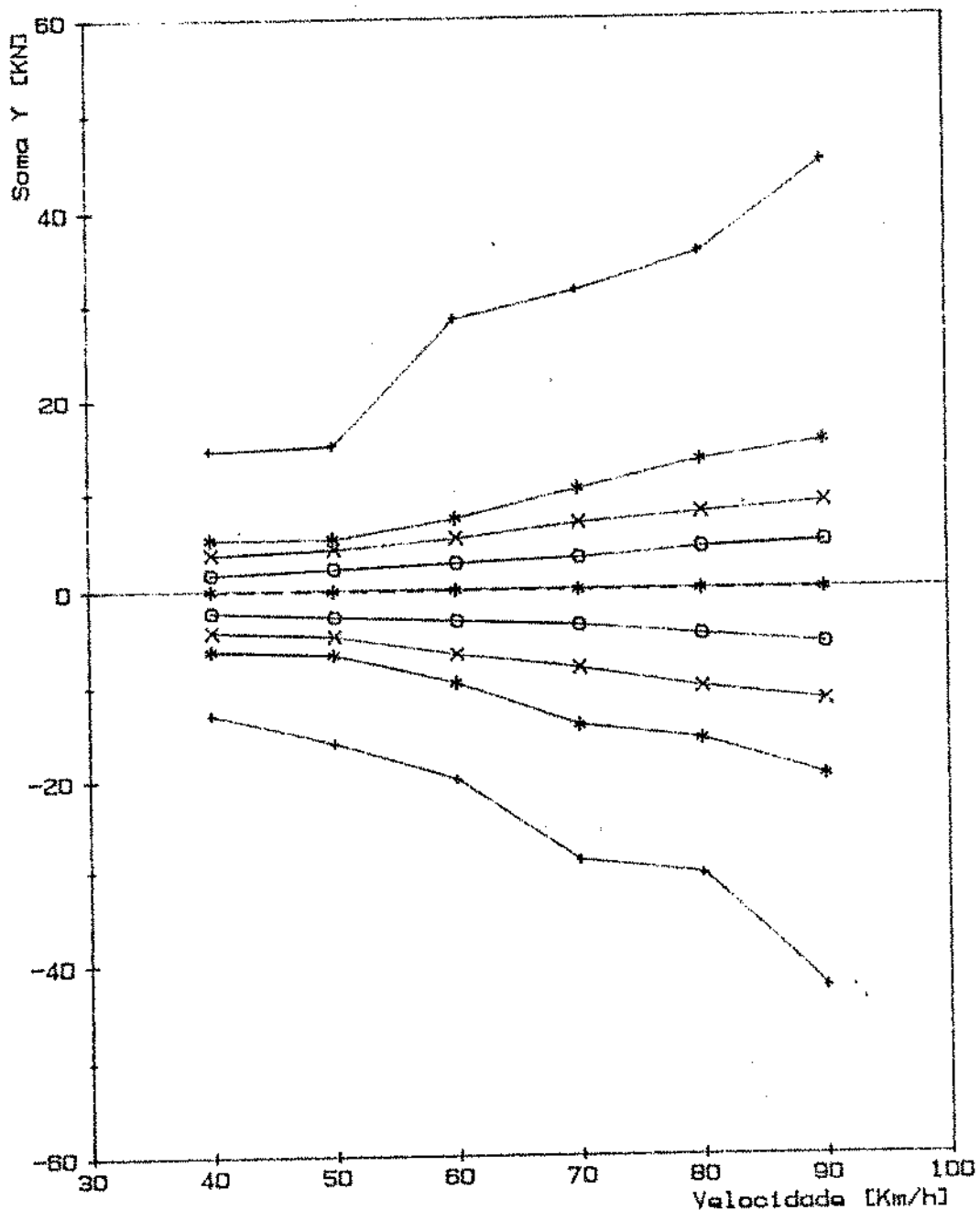
Verif. SF 25, 8, 84

Figura 11 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Vazio-Configuração U - Trecho em Reta



# CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: 1USYr  
Truque : lhb- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



## LEGENDA :

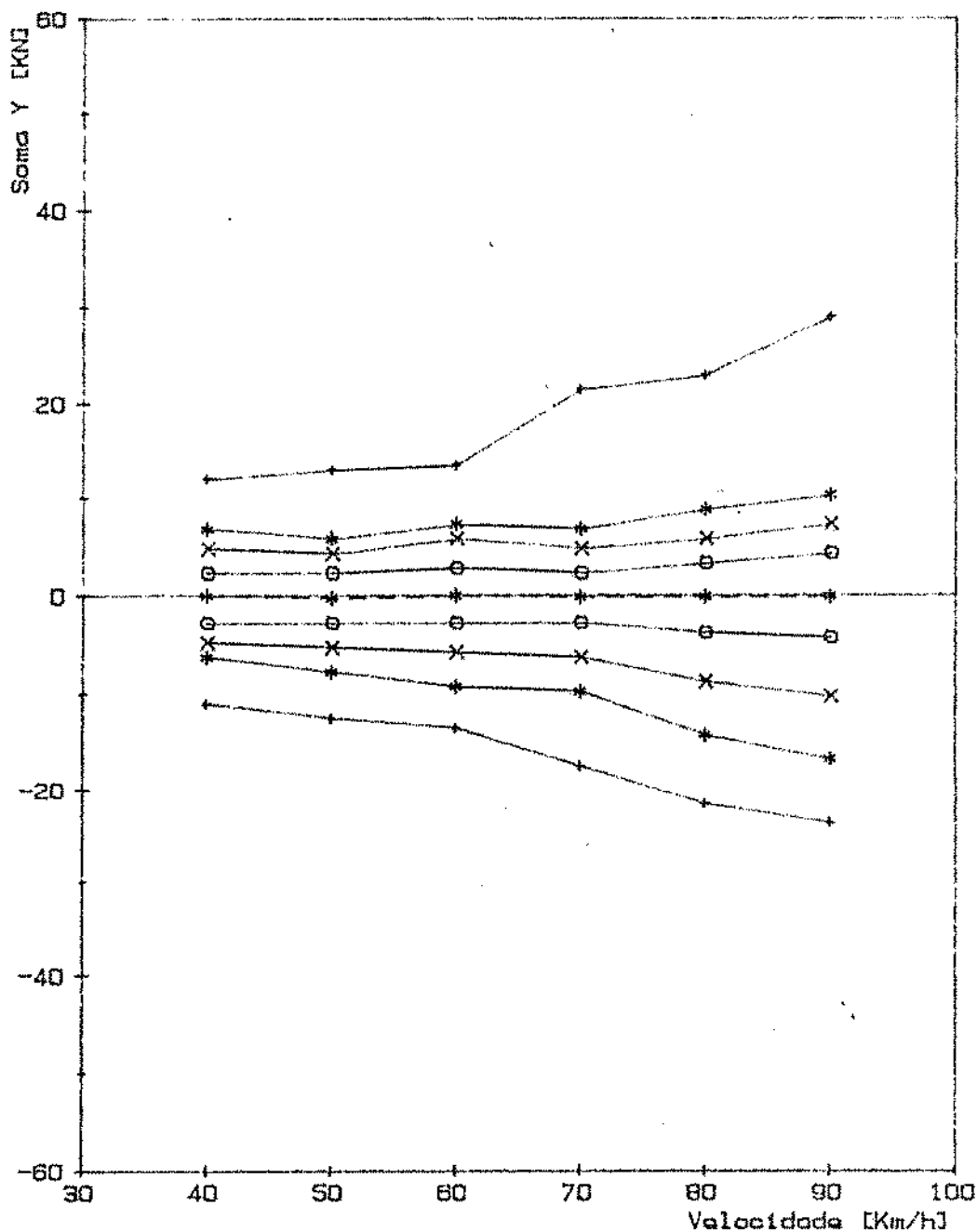
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- ▲ - - - - ▲ LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- - - - - □ LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif. SF 25.8.84

Figura 12 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque LHB - Vagão Vazio - Configuração U - Trecho em Reta.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: cPSYr  
Truque : cob- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

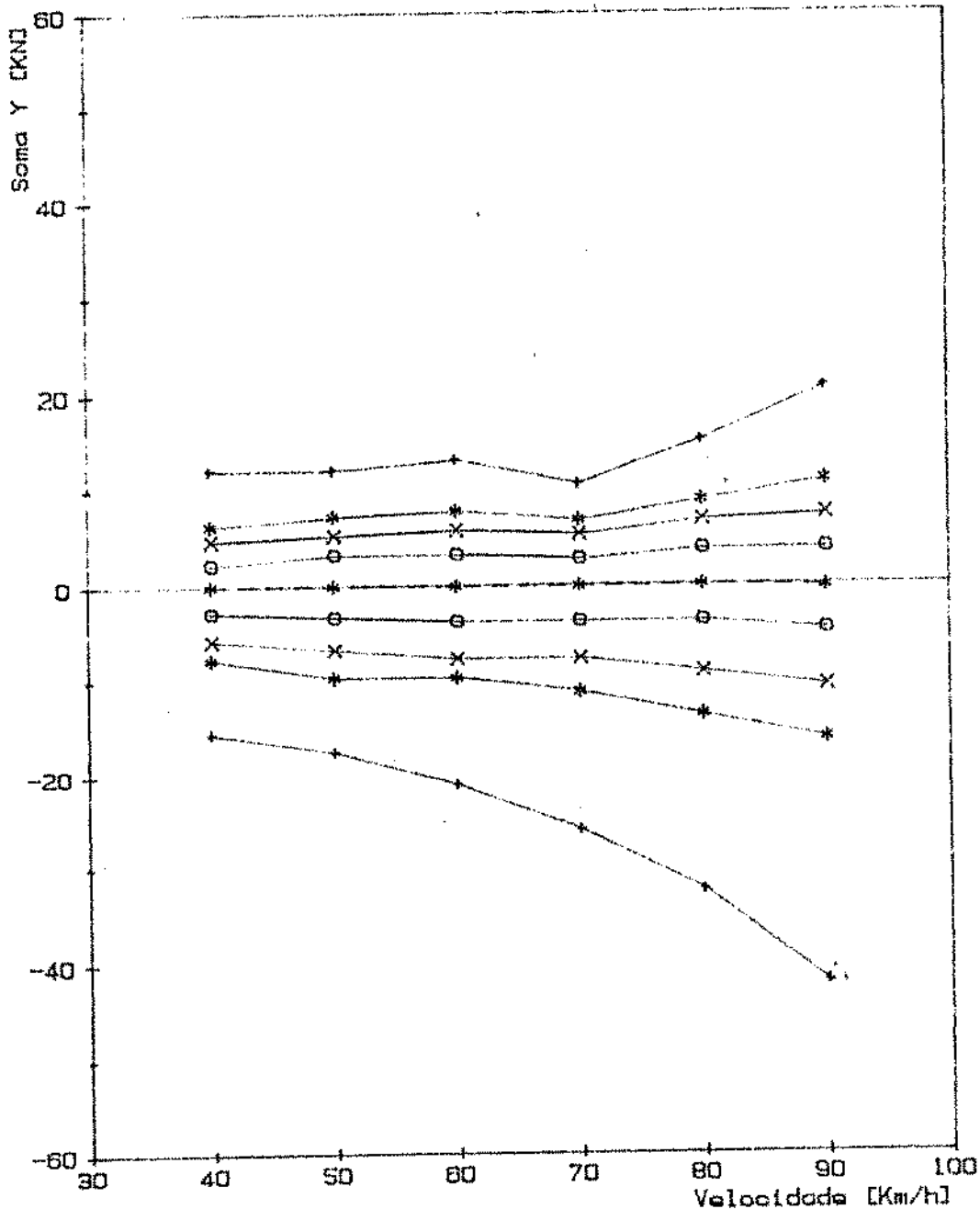
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SV 75, 0, 89.

Figura 13 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque COBRASMA - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

# CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: FPSYr  
Truque : fnvc- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



## LEGENDA :

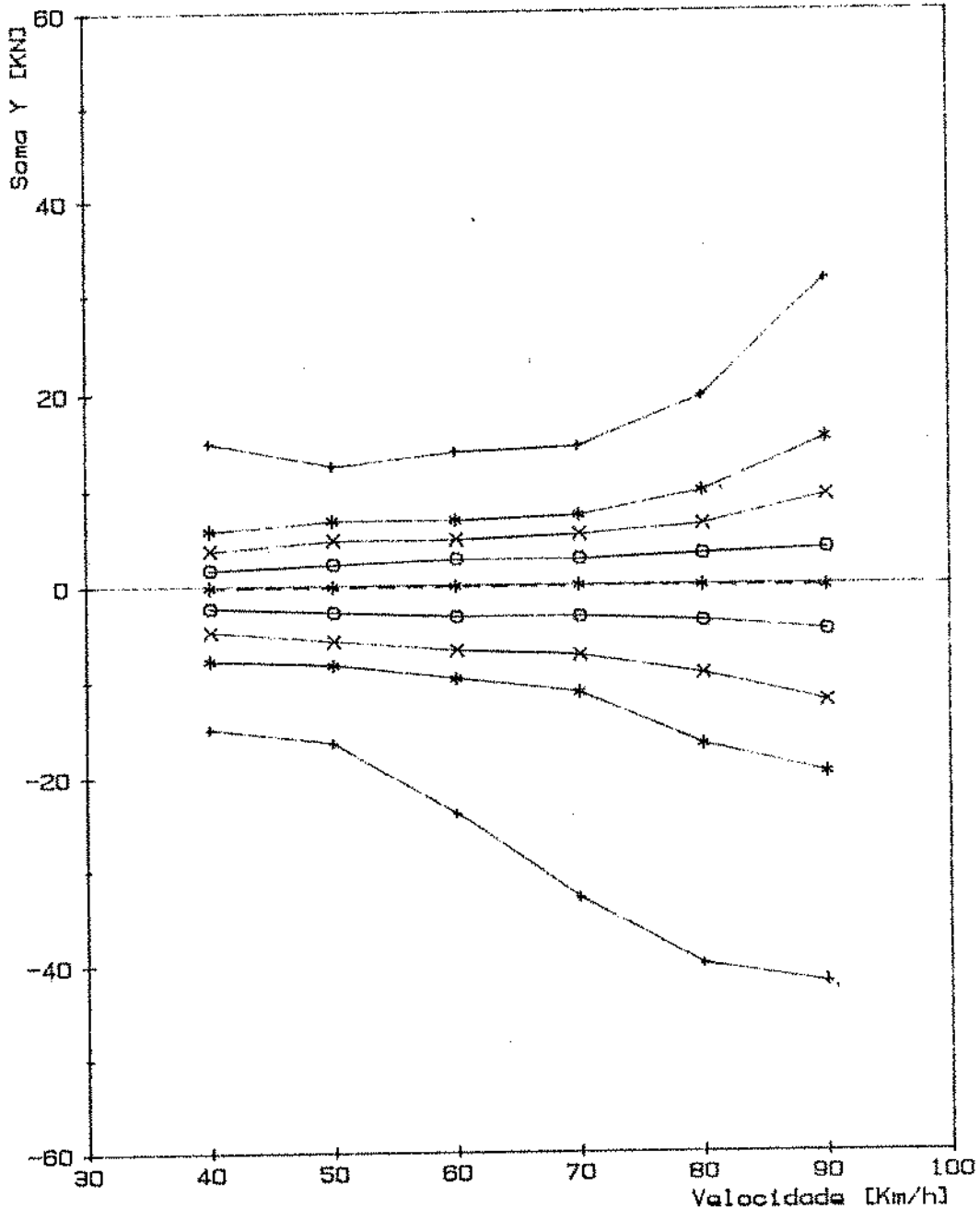
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- ▲— LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \*— LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x— LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o— LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif. Truque: 04/09/84

Figura 14 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV com C-PEP - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reto.

# CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: FPSYr  
Truque : fnvs- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



## LEGENDA:

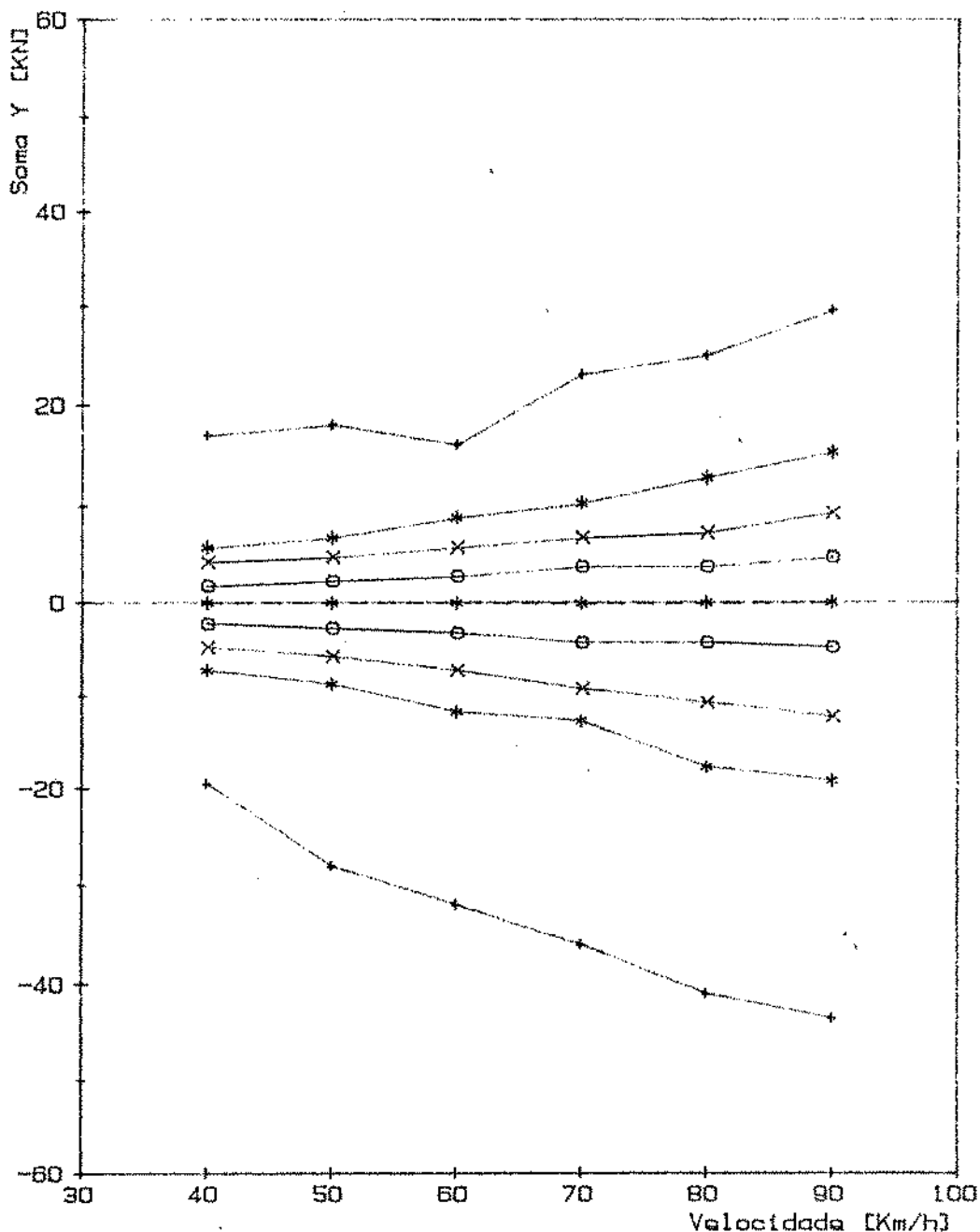
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 88% DOS VALORES

Verif.: SF 3/5, 8/8

Figura 15 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: IPSYr  
Truque : lhb- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 0,8,84

Figura 16 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque LHB - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.



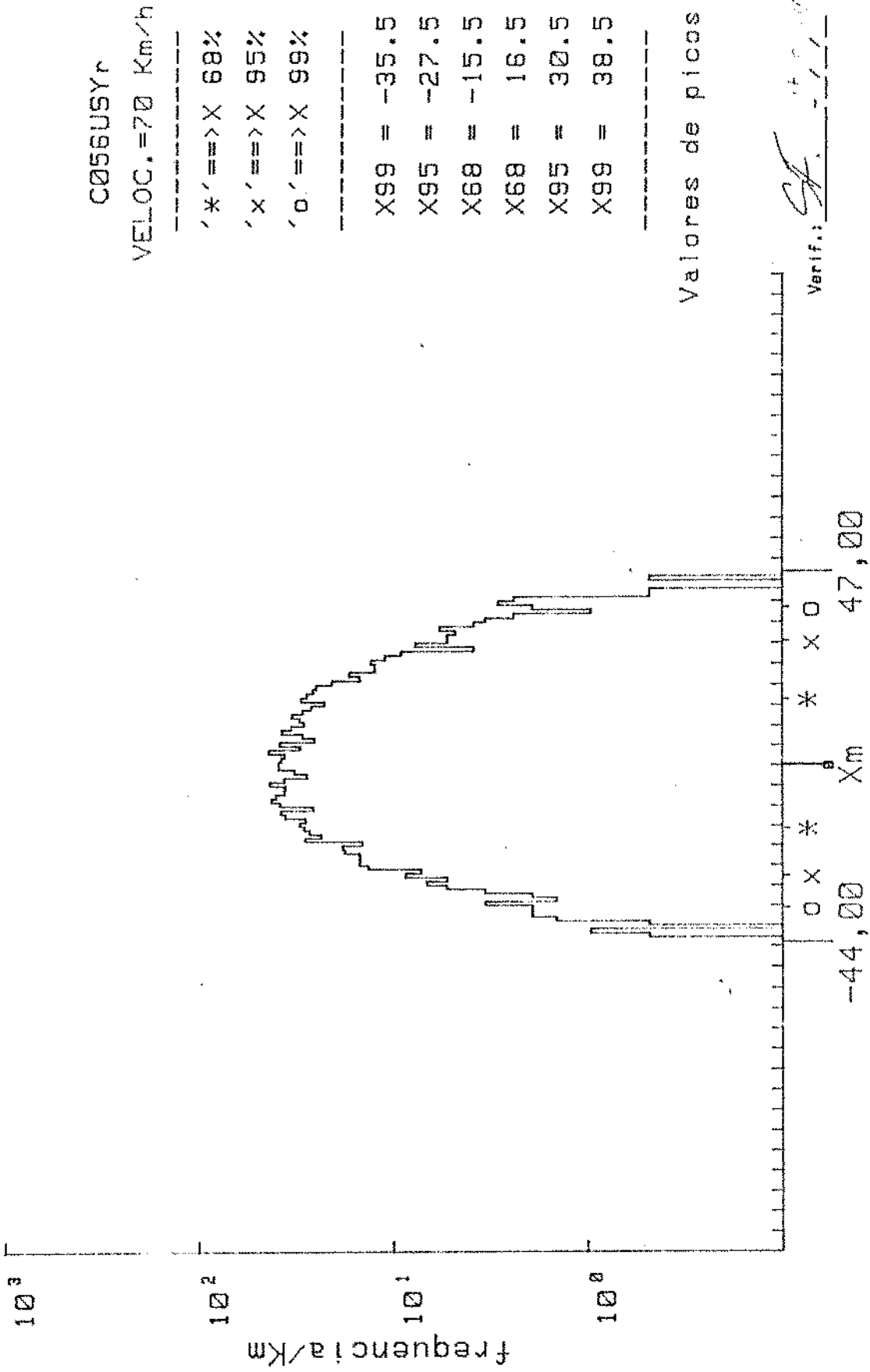
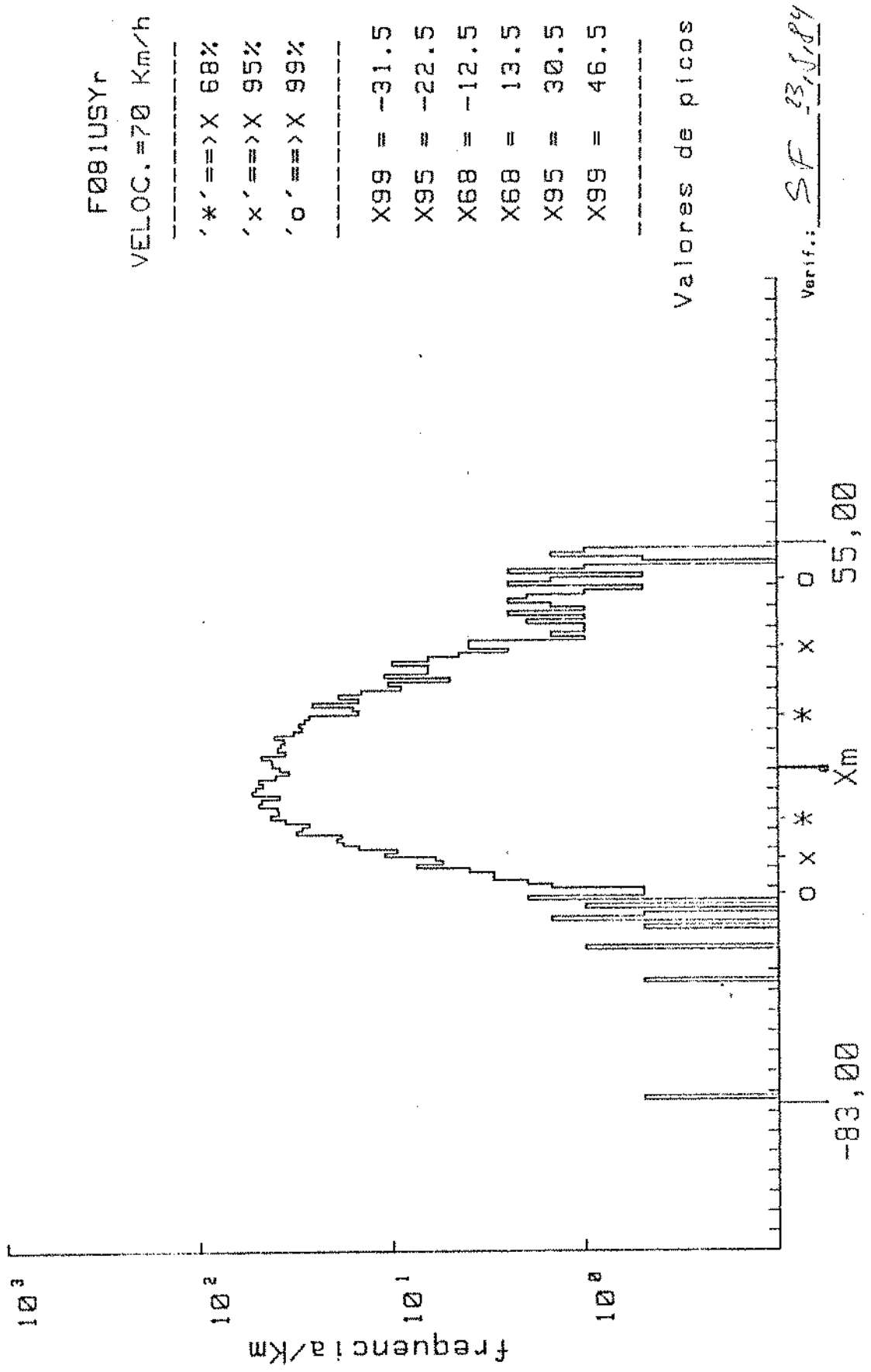


Figura 17 - Curva de distribuição de frequência de frequência da  $\Sigma Y$  para o Truque COBRASMA Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.



SOMA Y [KN]  
 Figura 18 - Curva de distribuição de frequência da  $\Sigma Y$  para o trauze FNV com C-PEP  
 Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.

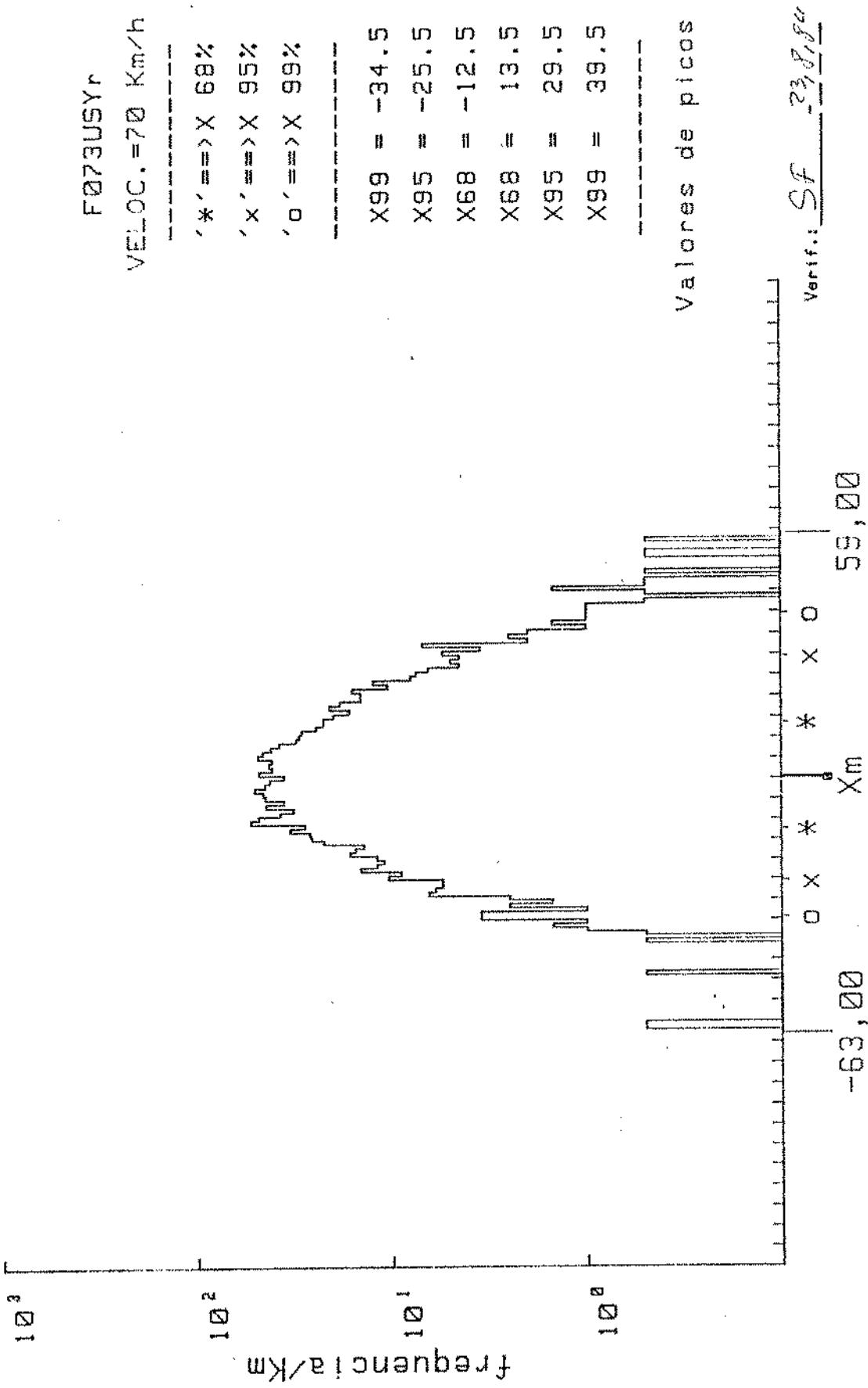


Figura 19 - Curva de distribuição de frequência da Y para o trauque FNV sem C-PEP  
 Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.

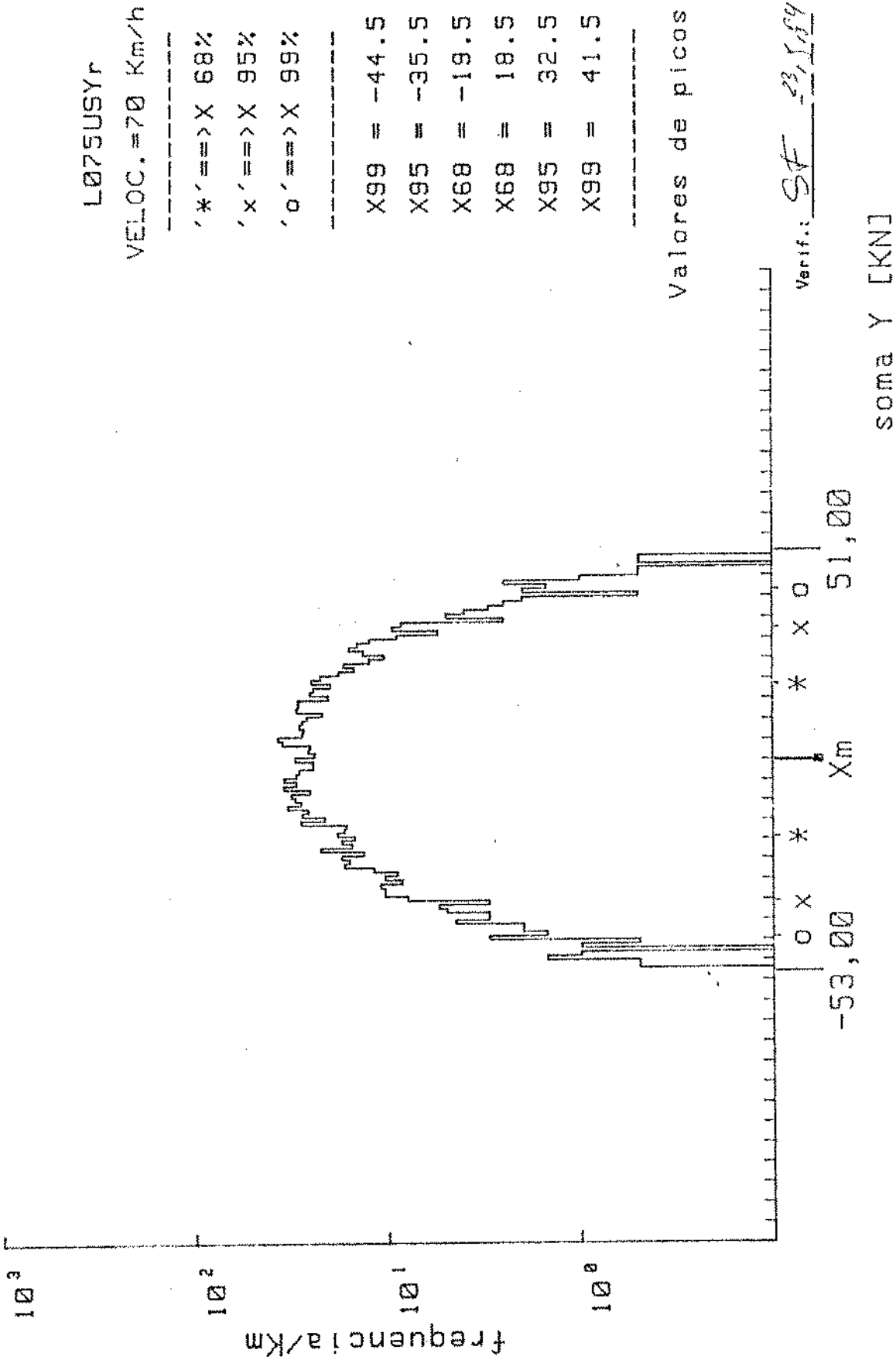


Figura 20 - Curva de distribuição de frequência da ΣY para o trauque LHB  
 Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.

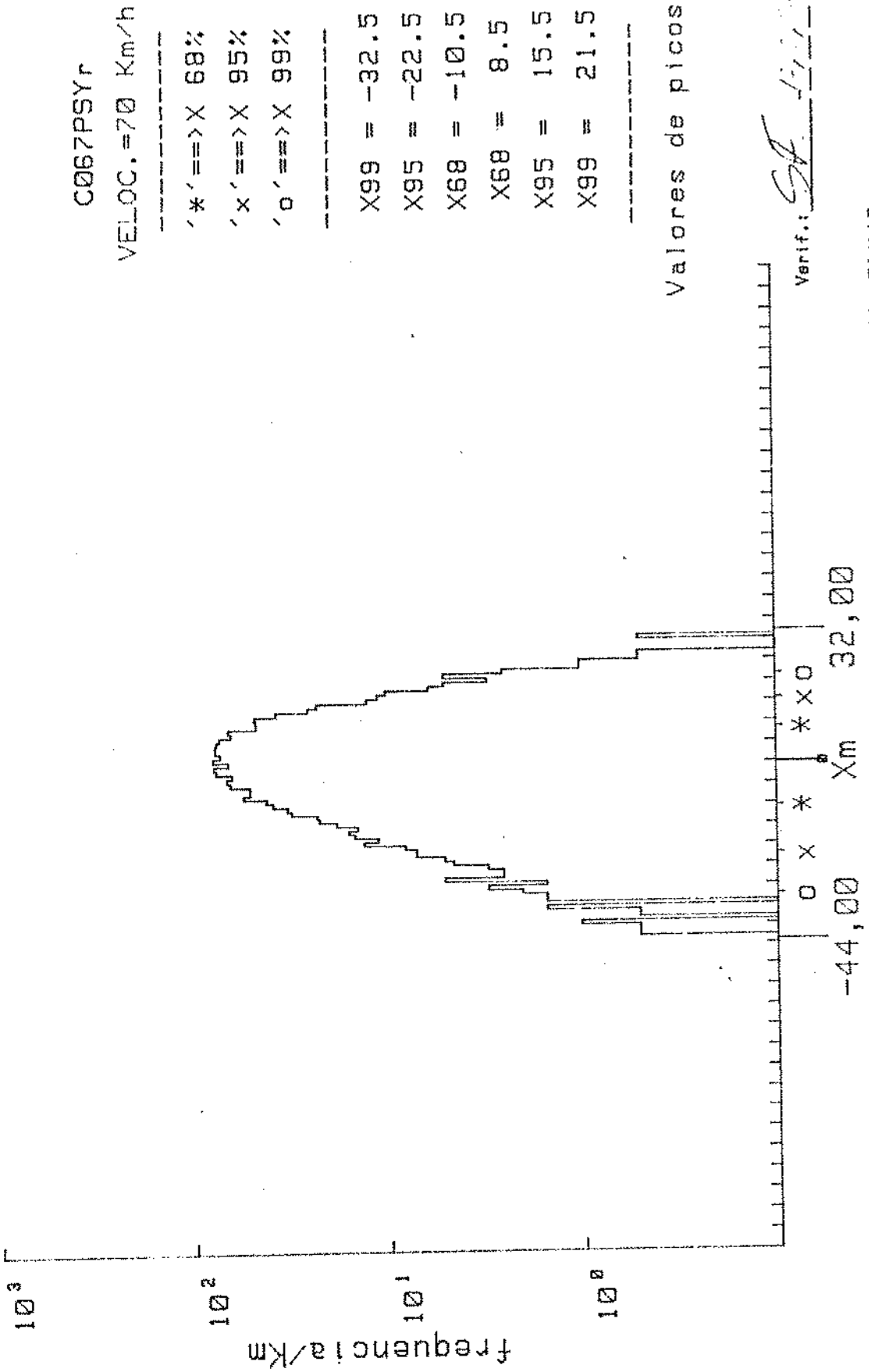


Figura 21 - Curva de distribuição de frequência da  $\Sigma Y$  para o truque COBRASMA Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.



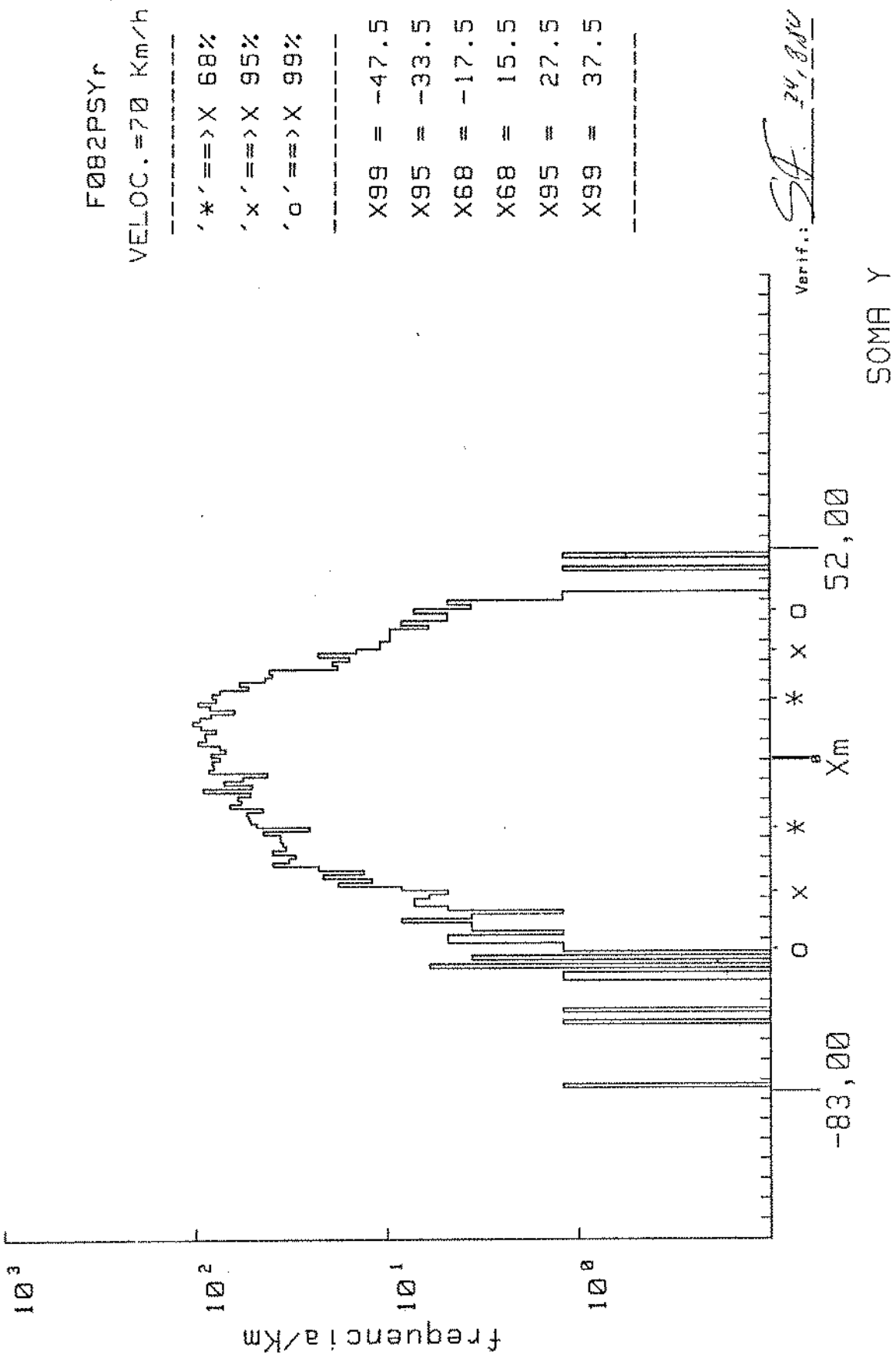


Figura 22 - Curva de distribuição de frequência da  $\Sigma Y$  para o truque FNV com C-PEP Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.

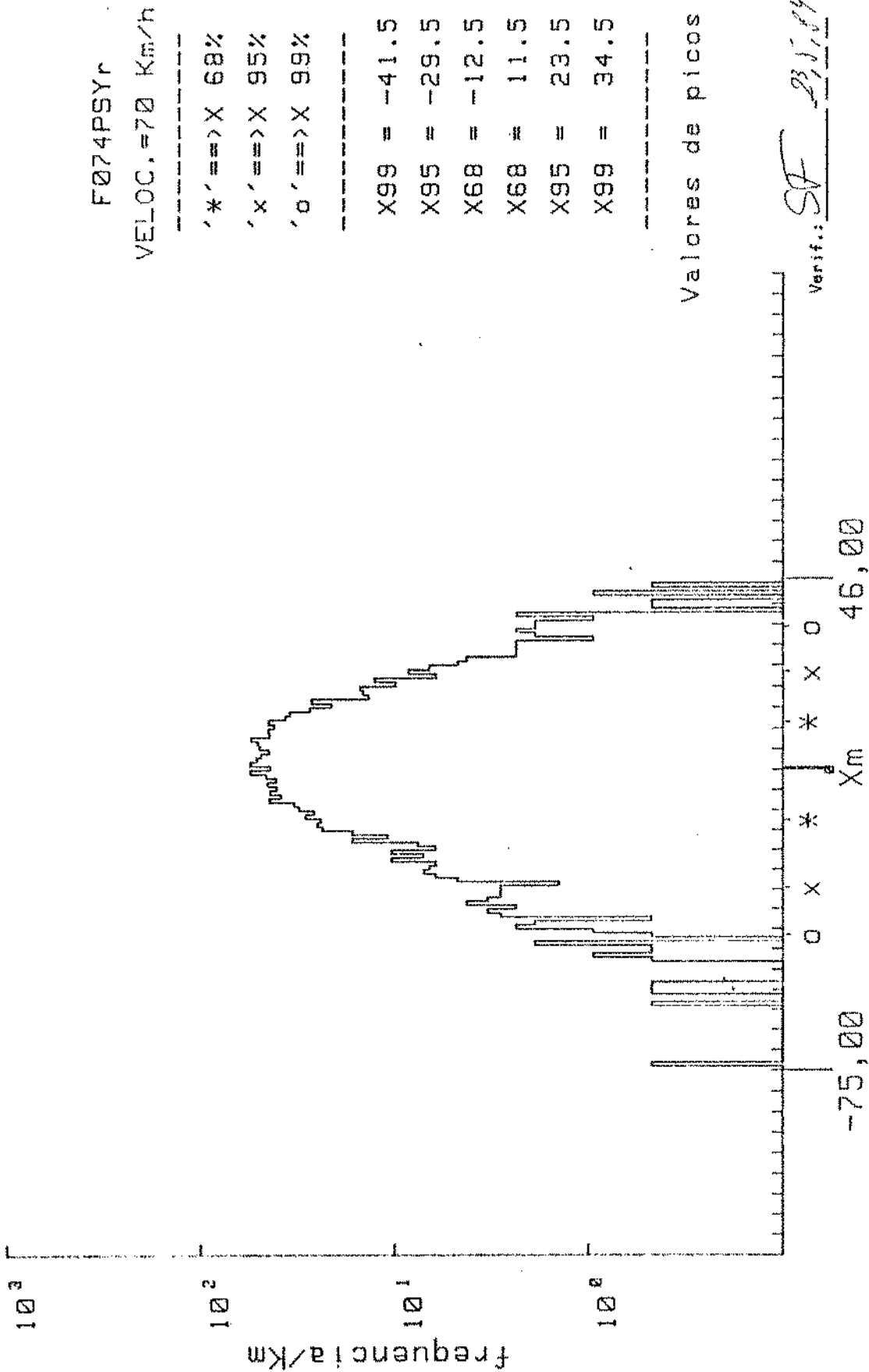


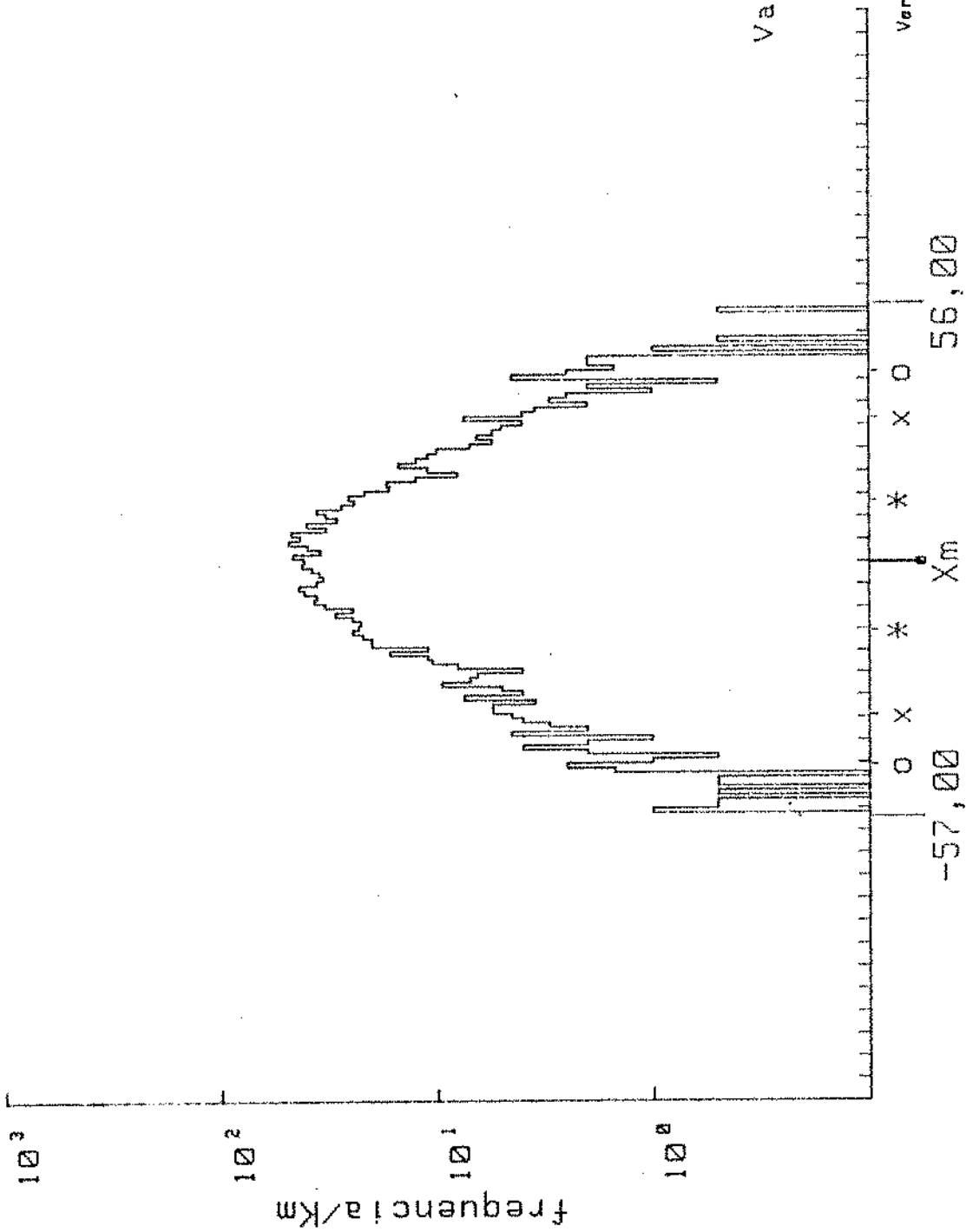
Figura 23 - Curva de distribuição de frequência da ΣY para o truque FNV sem C-PEP Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.

L060PSYr  
 VELOC. = 70 Km/h

-----  
 '\*' ==> X 68%  
 'x' ==> X 95%  
 'o' ==> X 99%  
 -----

X99 = -45.5  
 X95 = -34.5  
 X68 = -15.5  
 X68 = 13.5  
 X95 = 31.5  
 X99 = 41.5  
 -----

Valores de picos

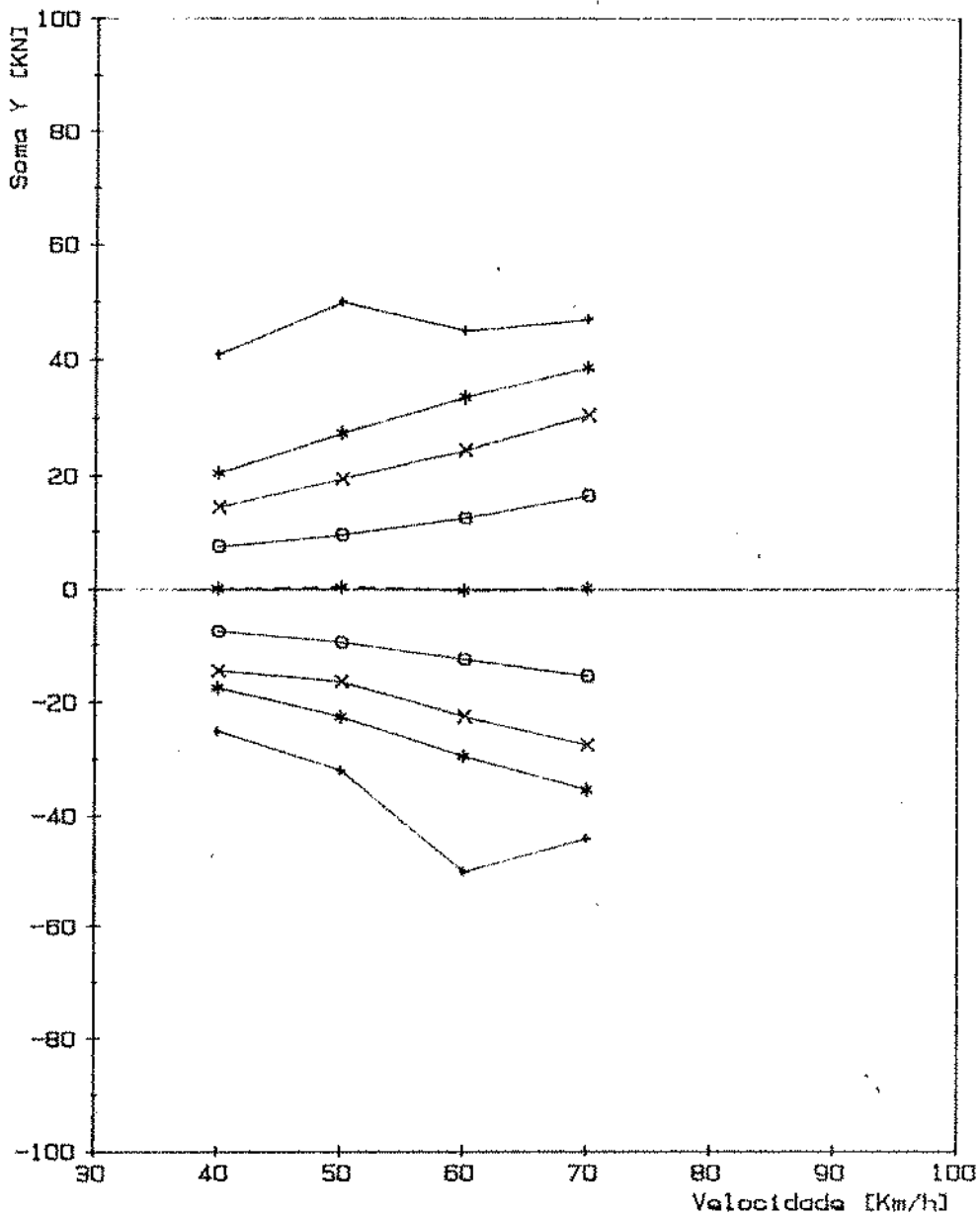


SOMA Y [KN]

Figura 24 - Curva de distribuição de frequência da  $\Sigma Y$  para o truque LHB  
 Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.

CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: CUSYr  
Truquo : COB- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



LEGENDA :

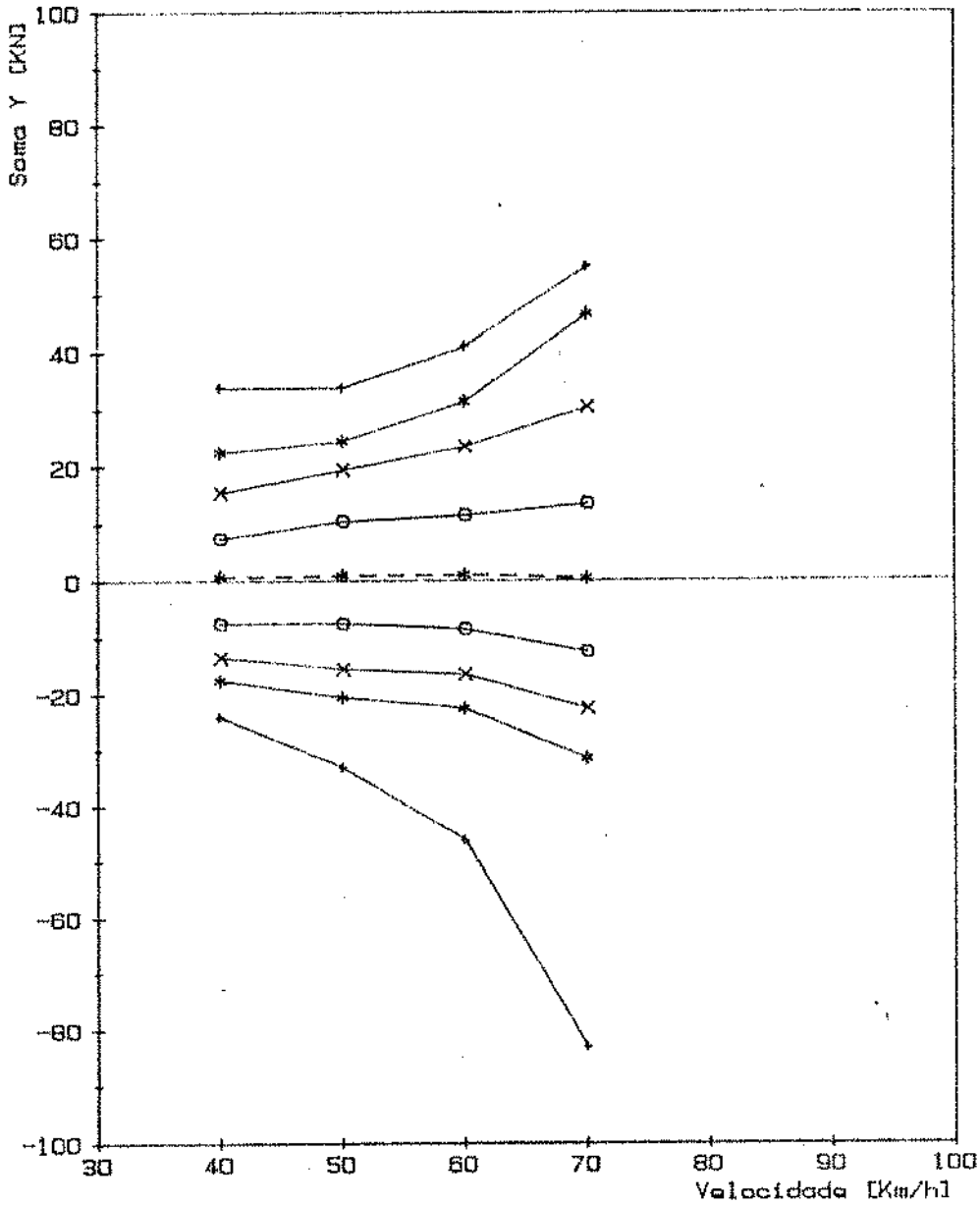
- \* - - - - + VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif. Gen 10/1/14

Figura 25 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque COBRASMA - Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.

CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: FUSYr  
Truque : FNVc- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



LEGENDA :

- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

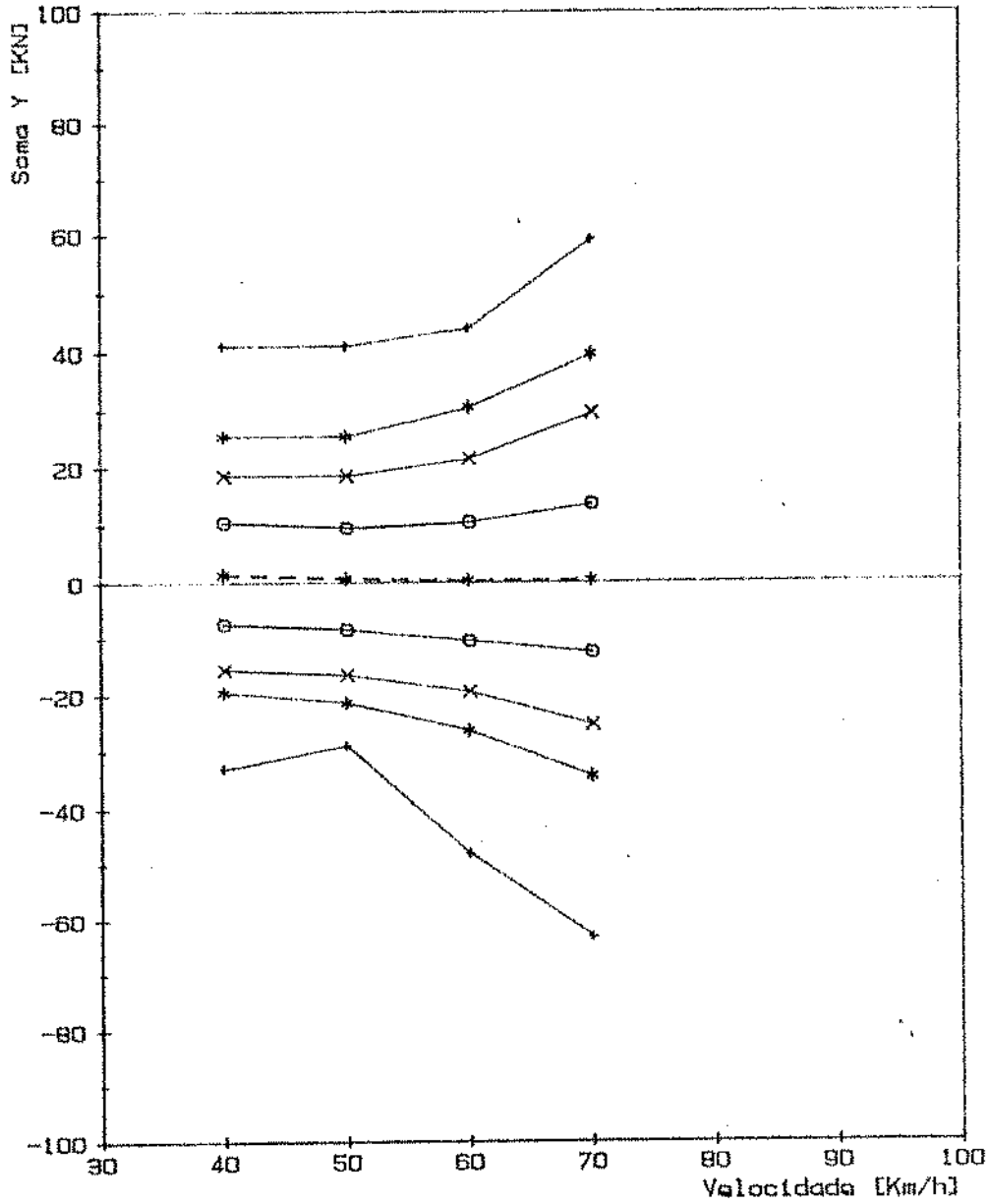
Verif. SF 23, 9/84

Figura 26 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99, X 100% para SY em função da velocidade para o truque FNV com C-PEP - Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.



CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: FUSYr  
Truque : FNVs- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



LEGENDA:

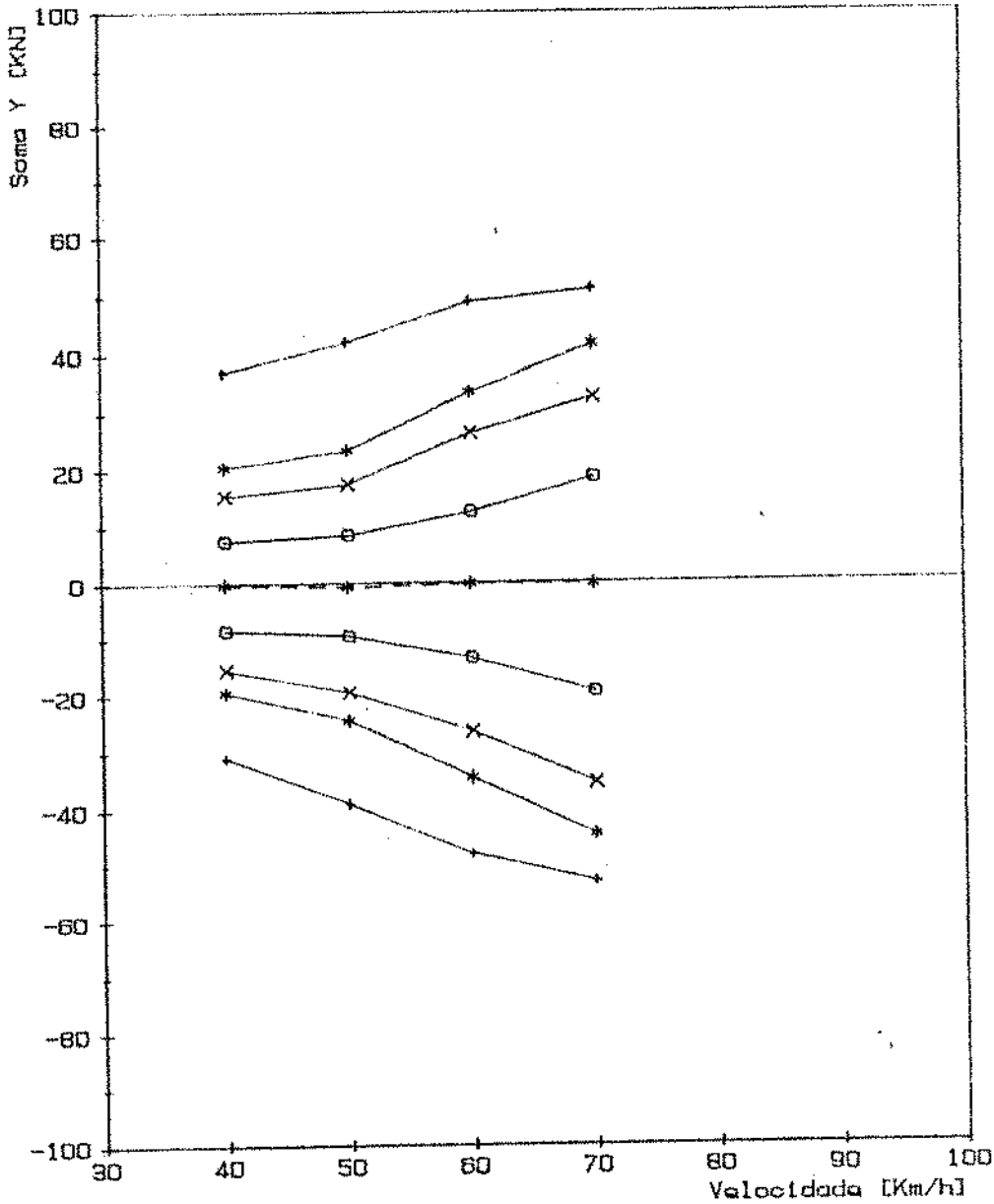
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- ▲ ————▲ LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* ————\* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x ————x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o ————o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 25/8/80

Figura 27 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reto.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: LUSYr  
Truque : LHB- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : U  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

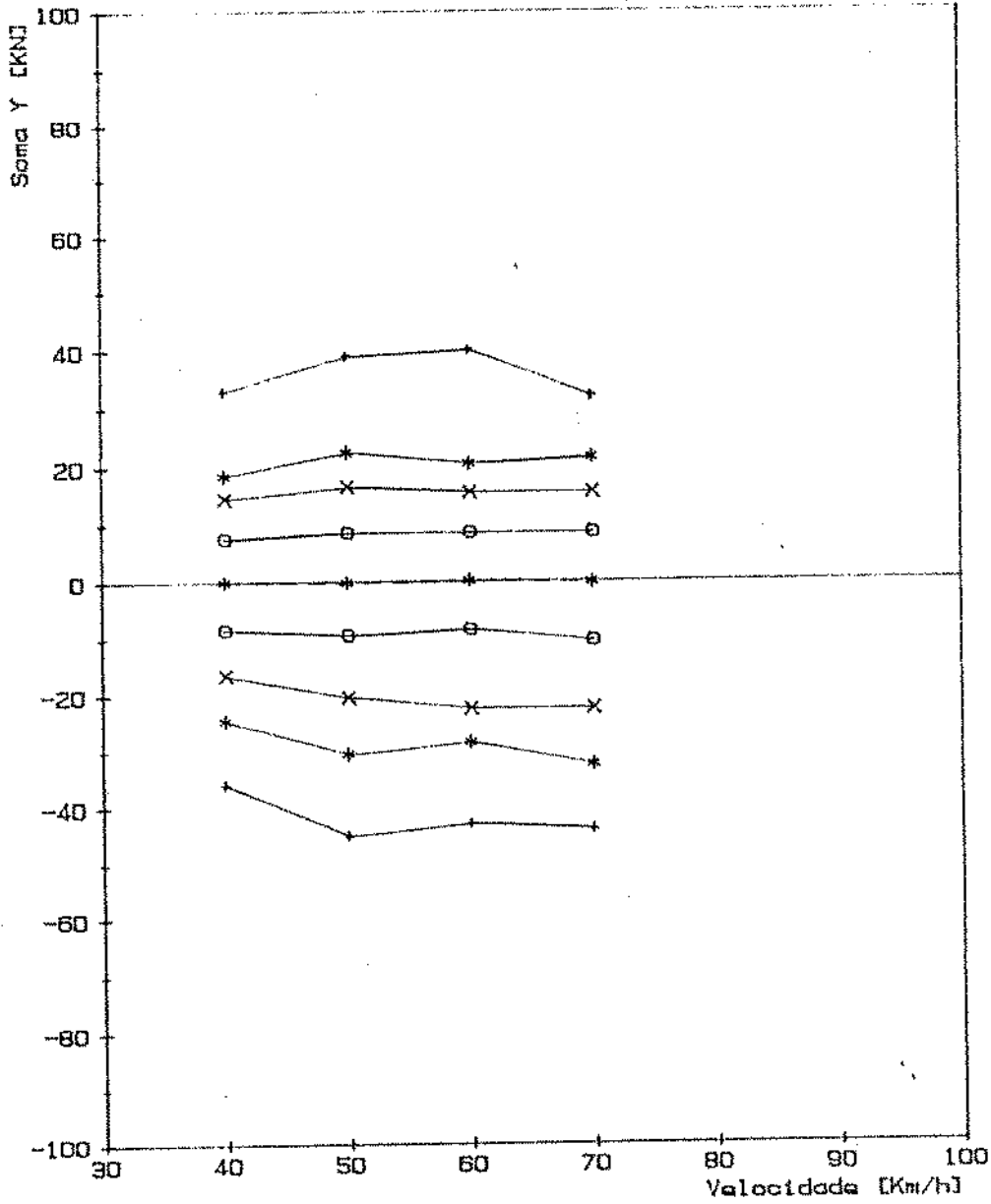
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 77 9/84

Figura 28 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque LHB - Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.

CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: CPSYr  
Truque : COB- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



LEGENDA :

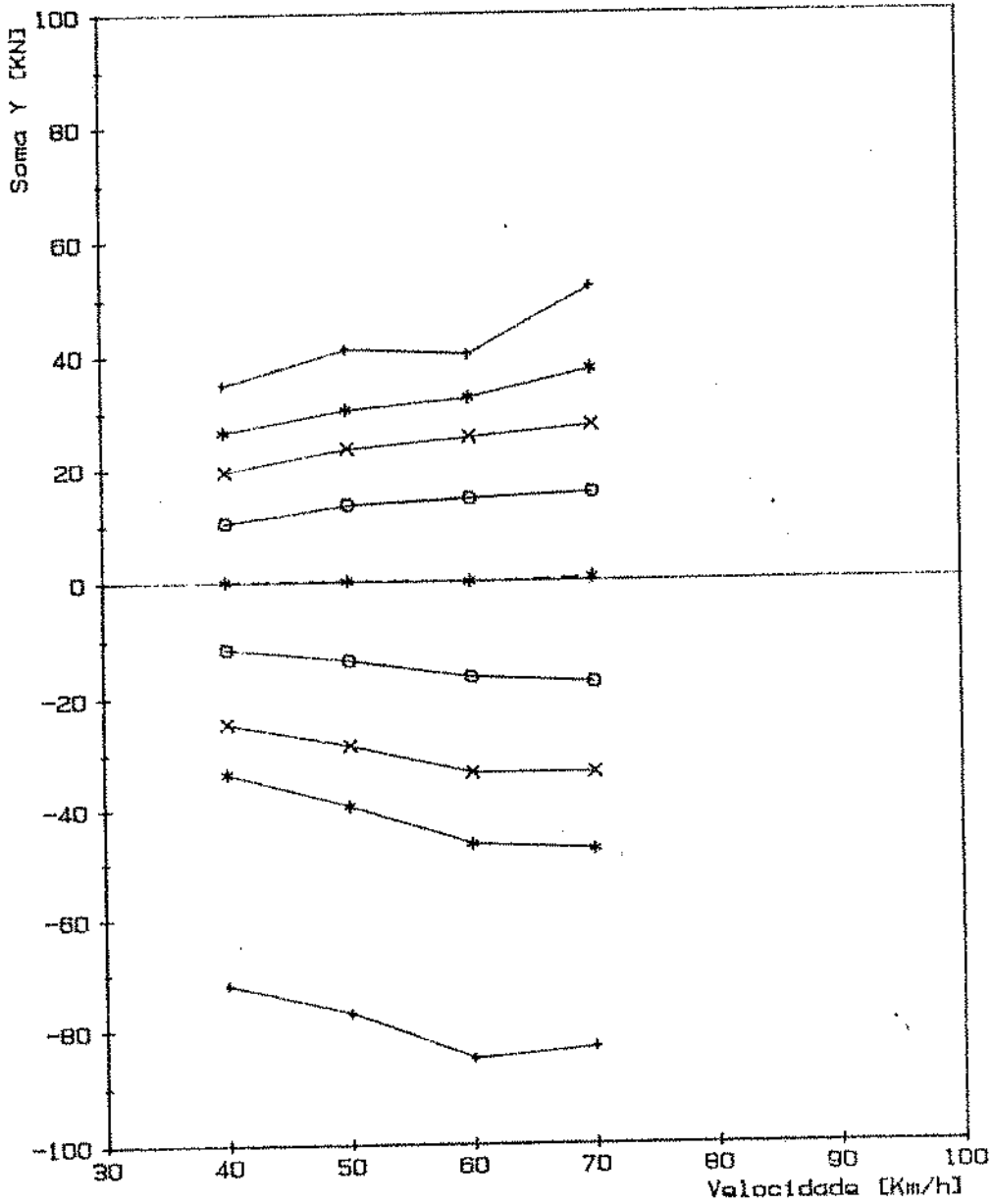
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- +-----+ LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \*-----\* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x-----x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o-----o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif. Geo 12/11/77

Figura 29 - : Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque COBRASMA - Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: FPSYr  
Truque : FNVC- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

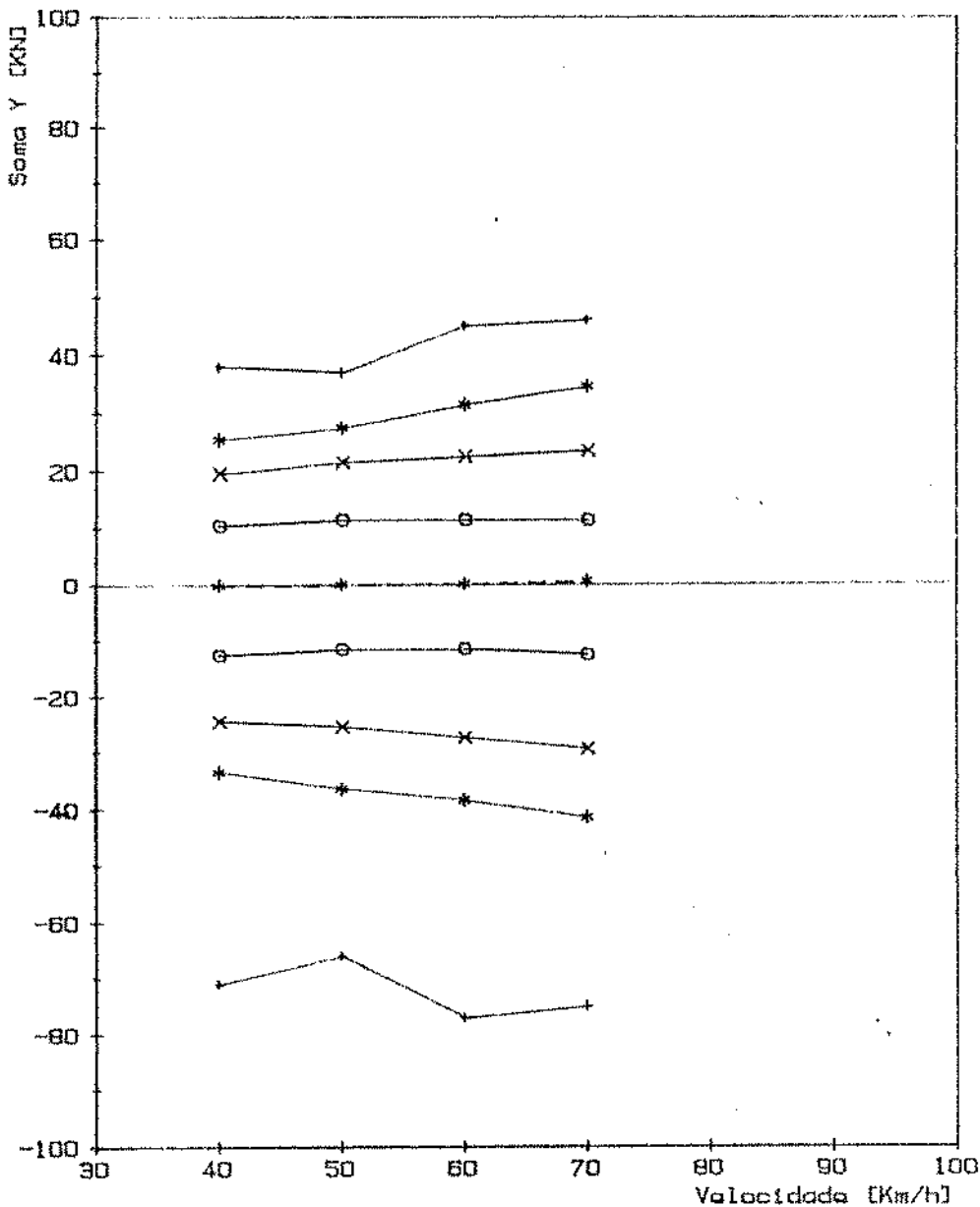
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- + - - - - + LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 12/8/84

Figura 30 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV com C-PEP - Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.

CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: F~~22~~PSYr  
Truque : FNVs- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



LEGENDA :

- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- ▲ - - - - ▲ LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- - - - - ○ LIMITE P/ 68% DOS VALORES

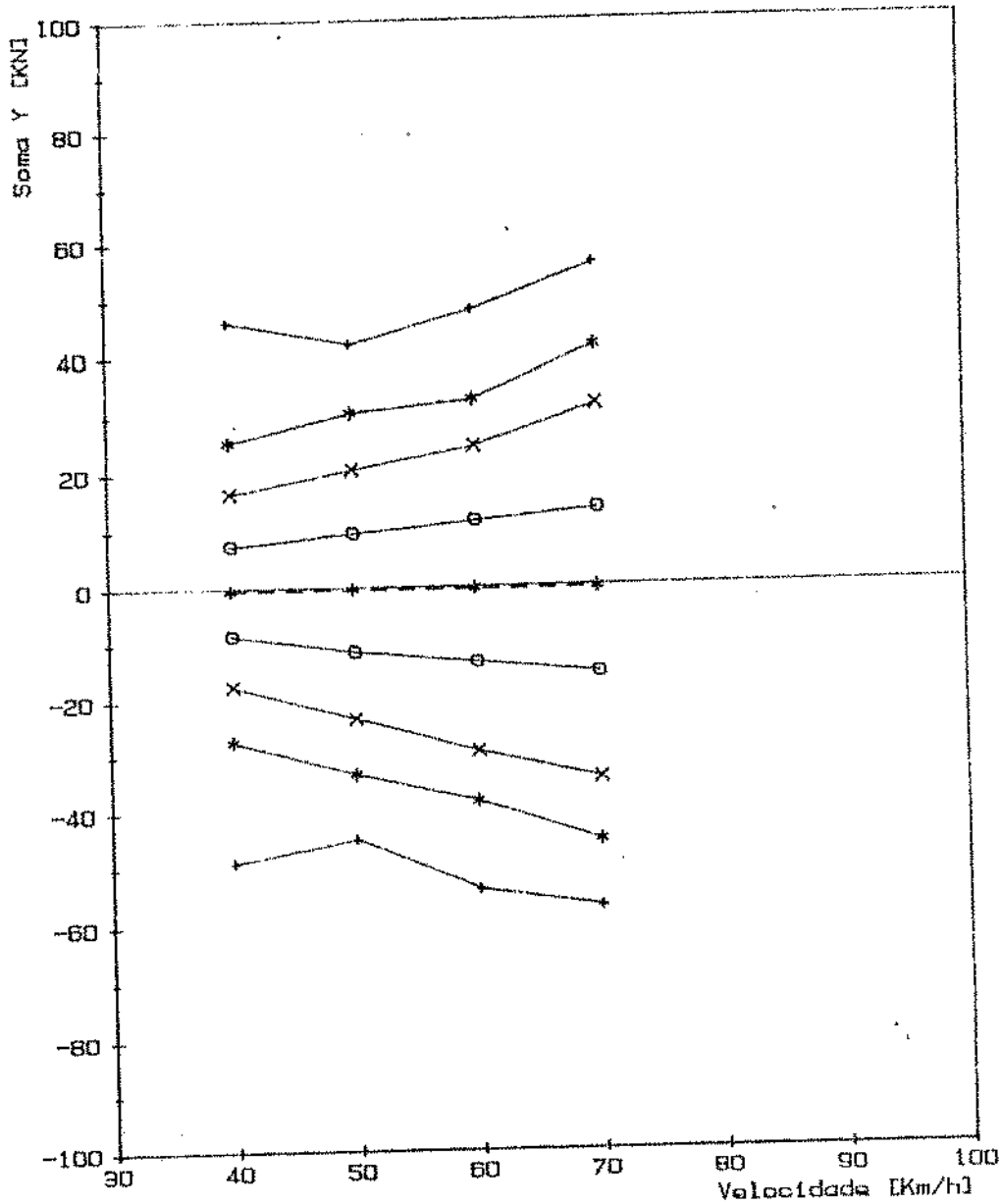
Verif.: SF 25.8/54

Figura 31 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.



### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: LPSYr  
Truque : LHB- carregado  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : SY [KN]



#### LEGENDA :

- - - - - + VALOR MEDIO
- - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 25/8/84

Figura 32 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para  $\Sigma Y$  em função da velocidade para o truque LHB - Vagão Carregado - Configuração P - Trecho em Reta.

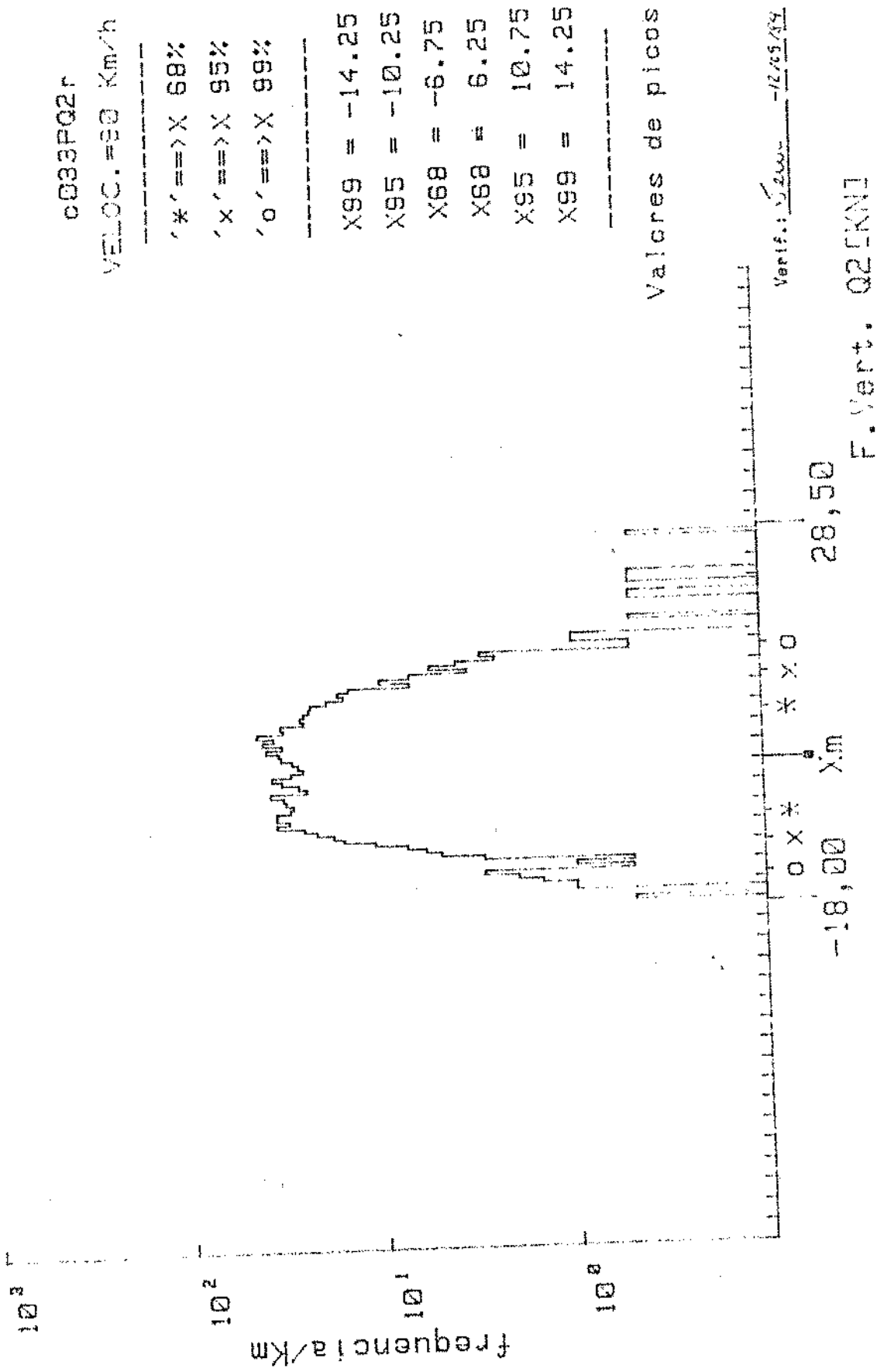


Figura 33 - Curva de distribuição de frequência da força Q<sub>2</sub> para o truque COBRASMA Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

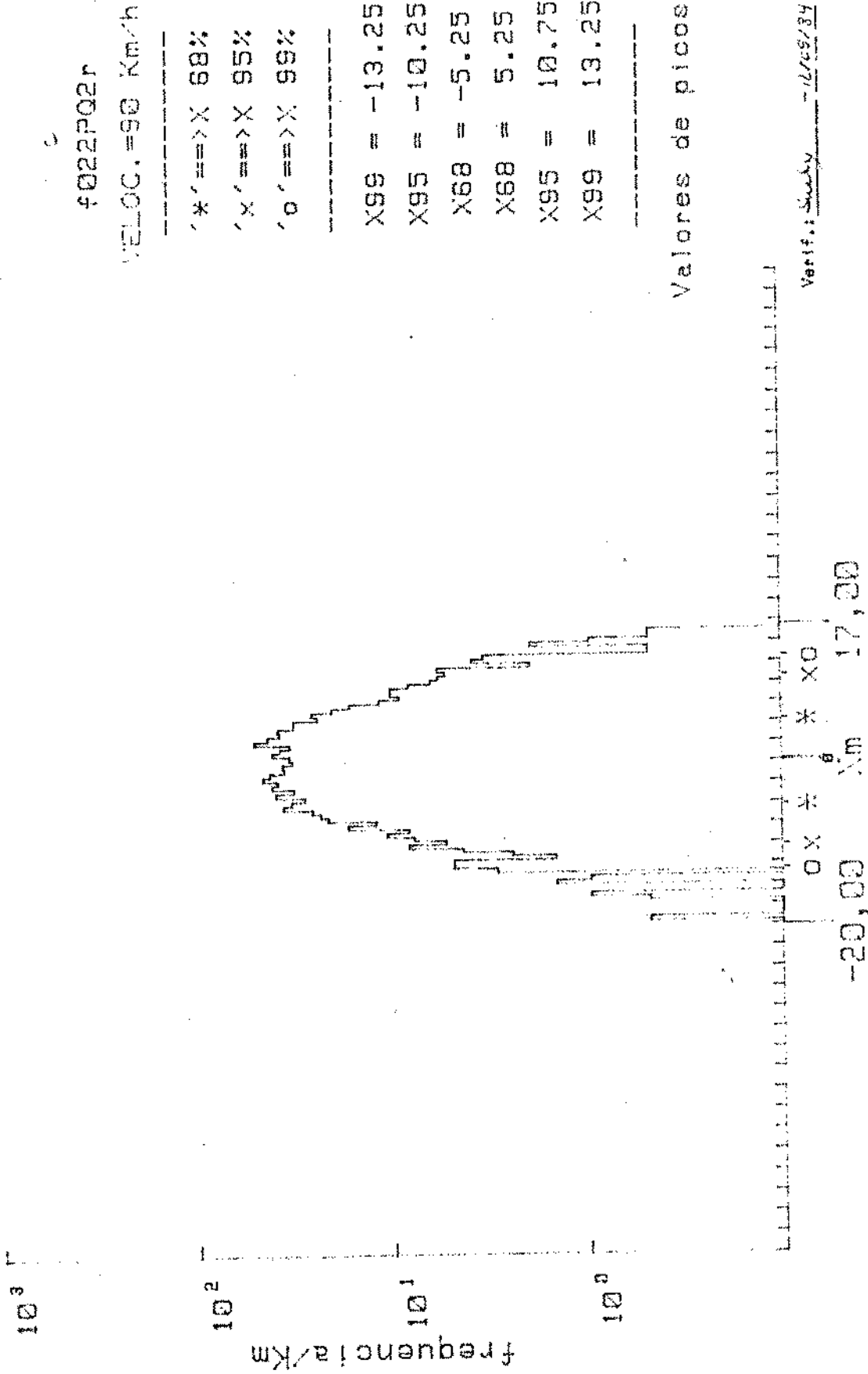
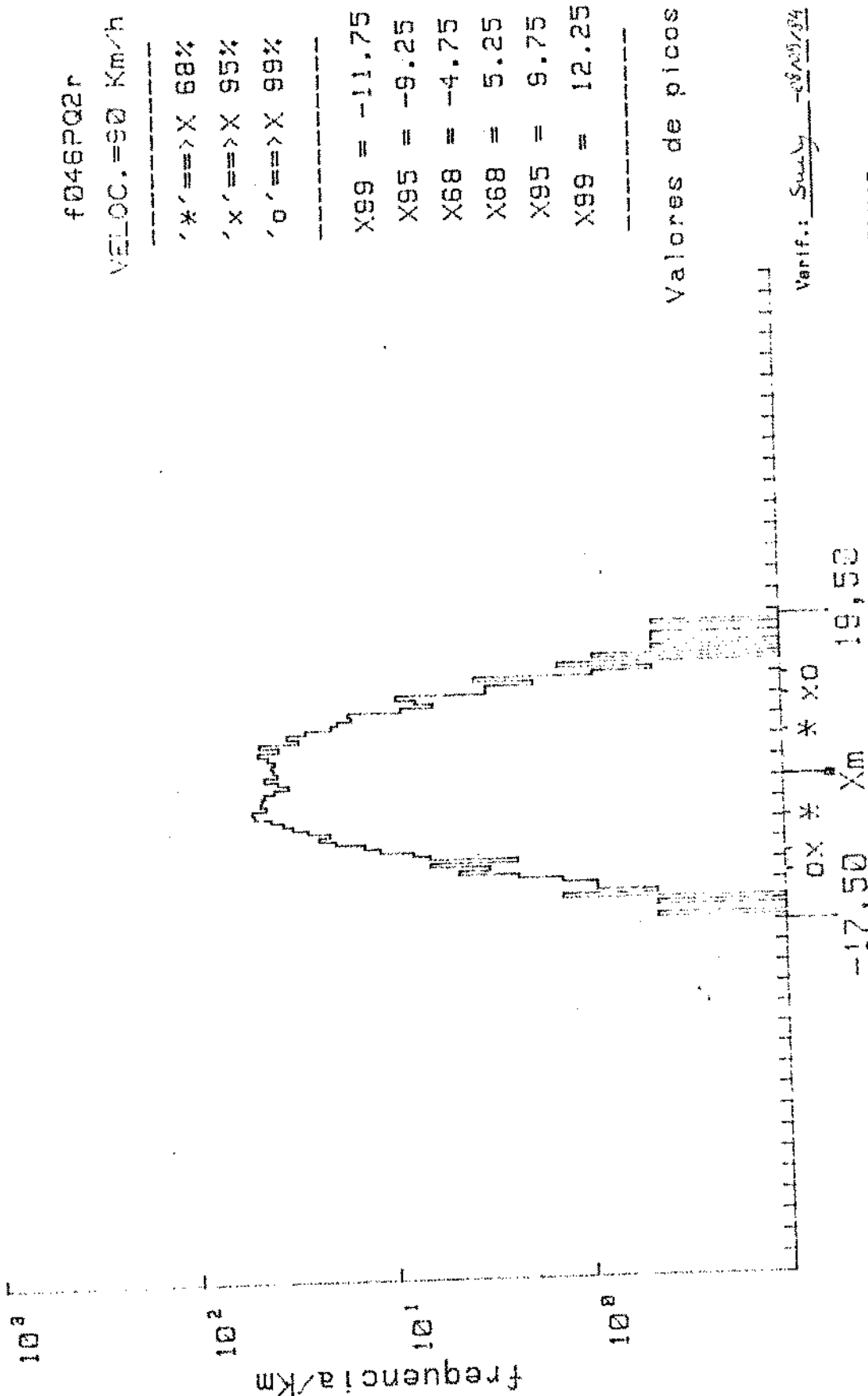


Figura 34 - Curva de distribuição de frequência da força  $Q_2$  para o truque FNV com C-PEP



F. Vert. Q2[KN]

Figura 35 - Curva de distribuição de frequência da força  $Q_2$  para o trauque FNV sem C-PEP

Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

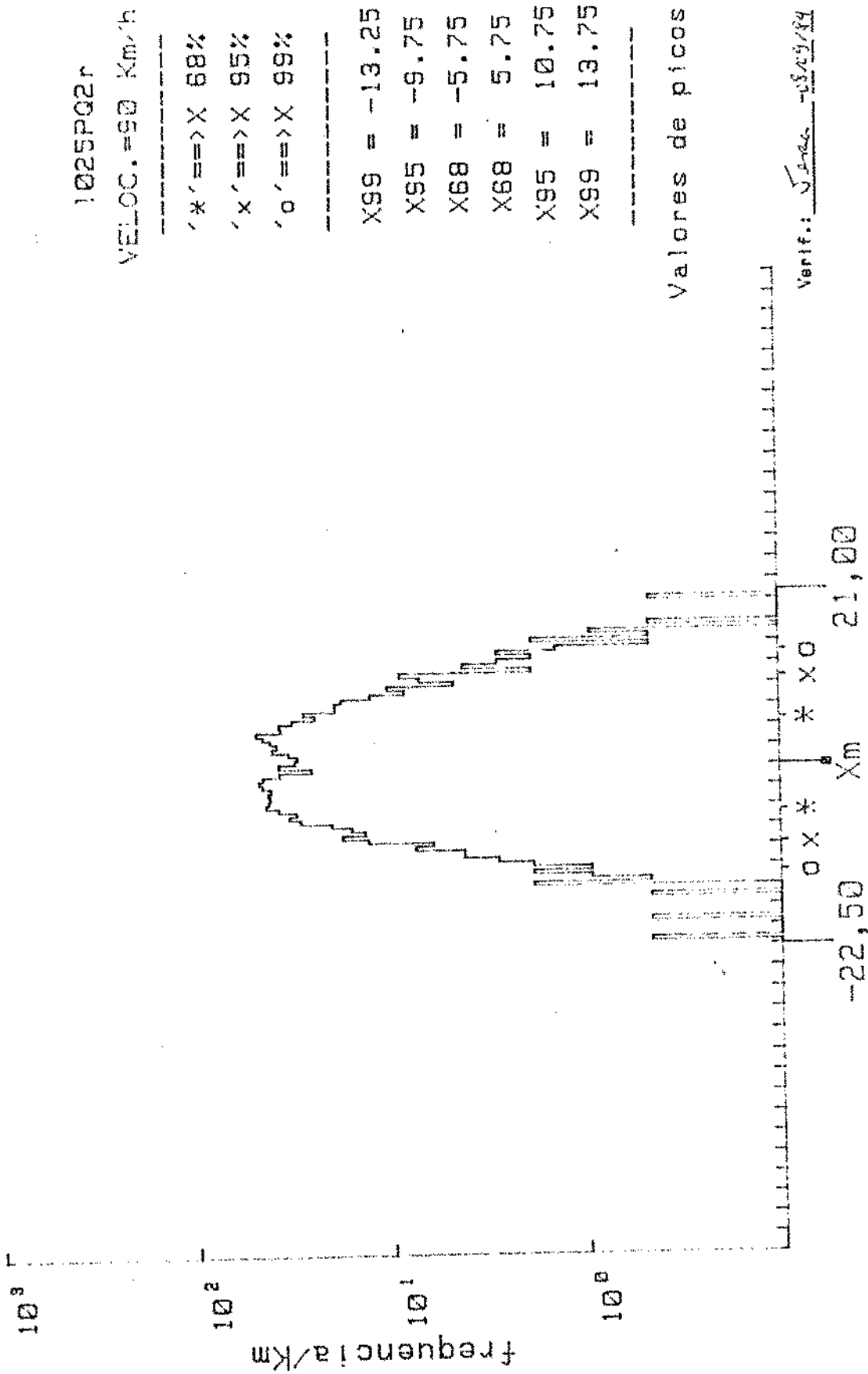
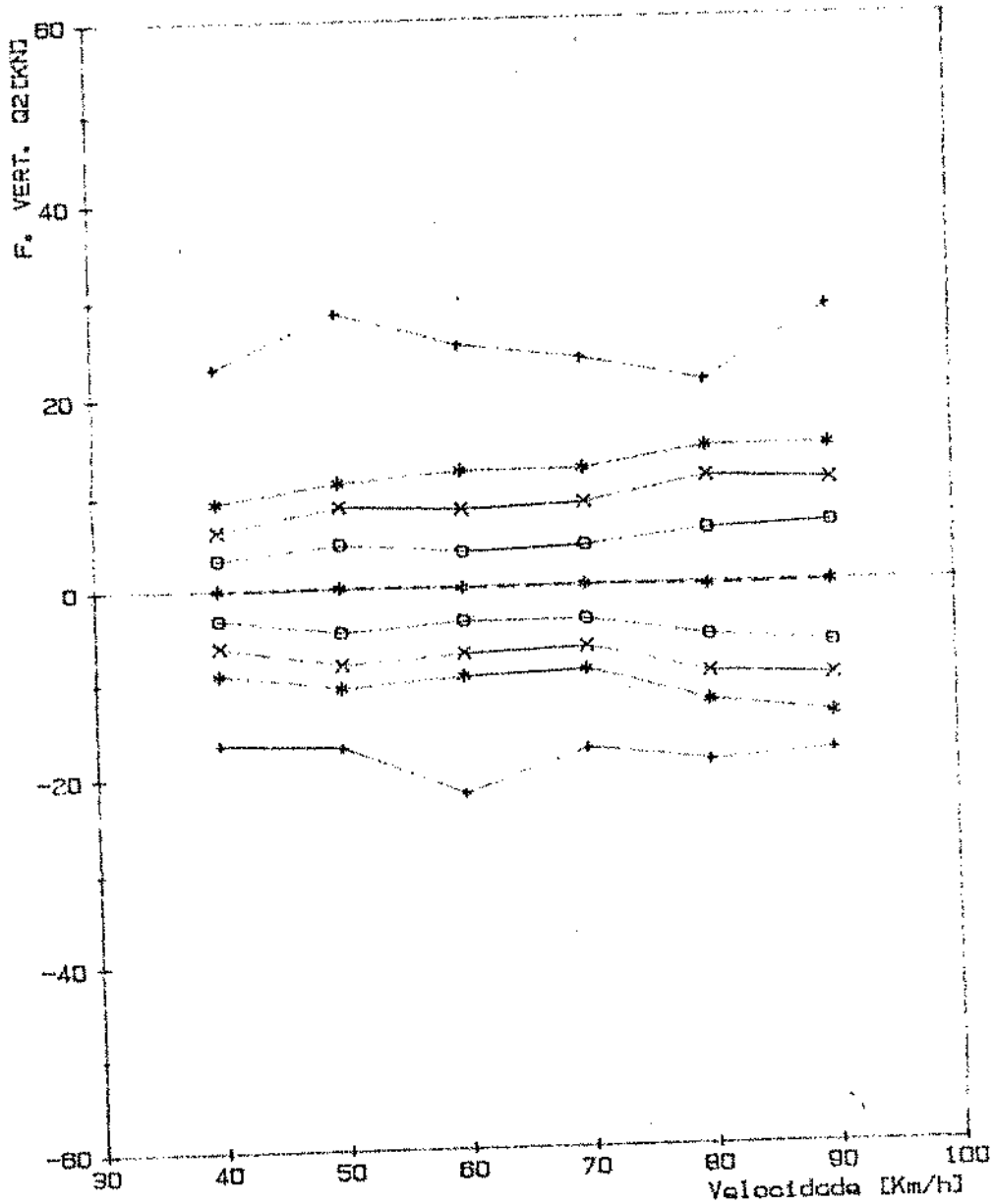


Figura 36 - Curva de distribuição de frequência da força Q<sub>2</sub> para o trauque LHB Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.



### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: cPQ2r  
Truque : cob- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : Q2 [KN]



#### LEGENDA:

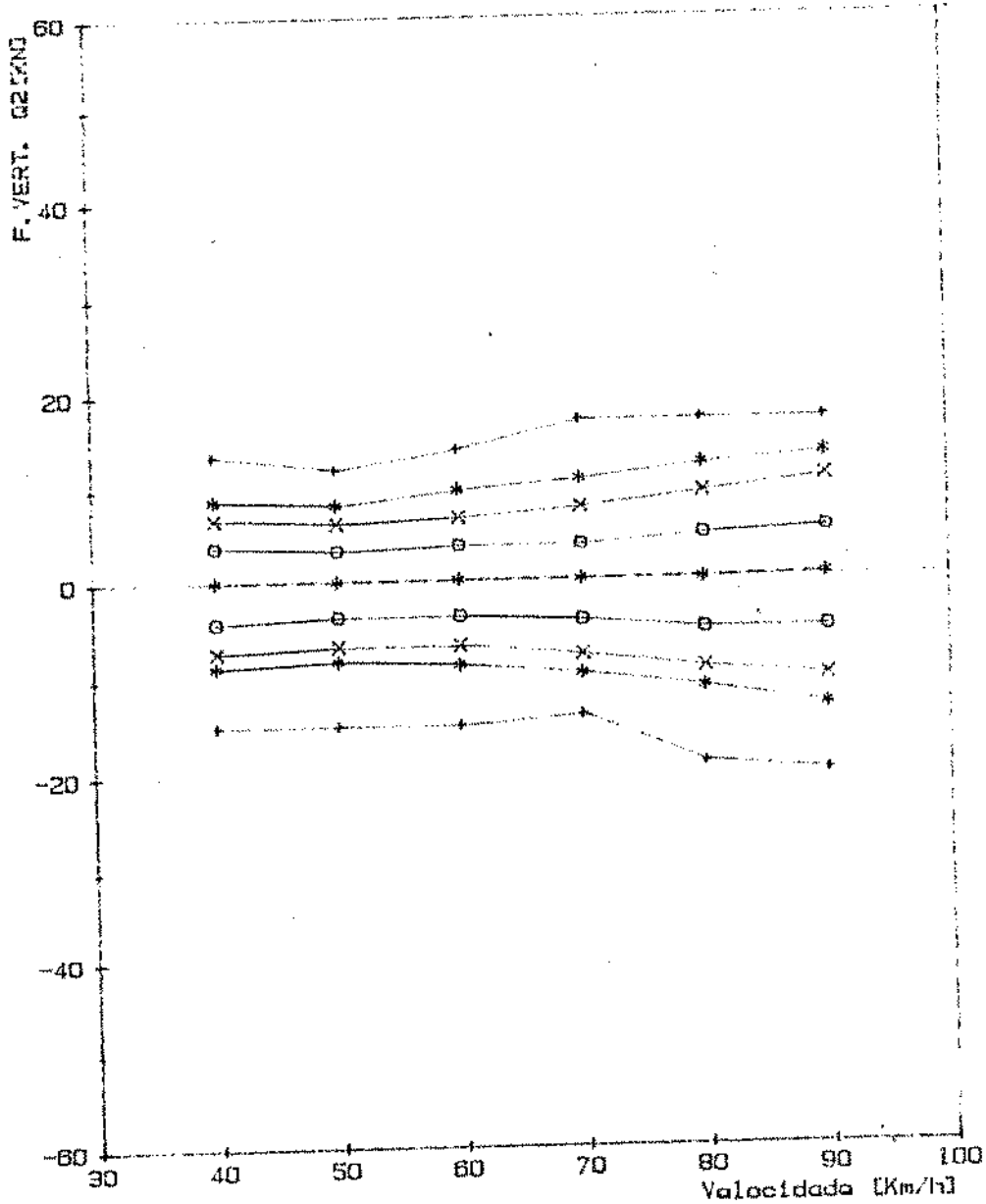
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- \*—\*— LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \*—\*— LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x—x— LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o—o— LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SA 25.8.59

Figura 37 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para força  $Q_2$  em função da velocidade para o truque COBRASMA. - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

### CRITÉRIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: fPQ2r  
Truque : fnvs- vazio  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : Q2 [KN]



#### LEGENDA :

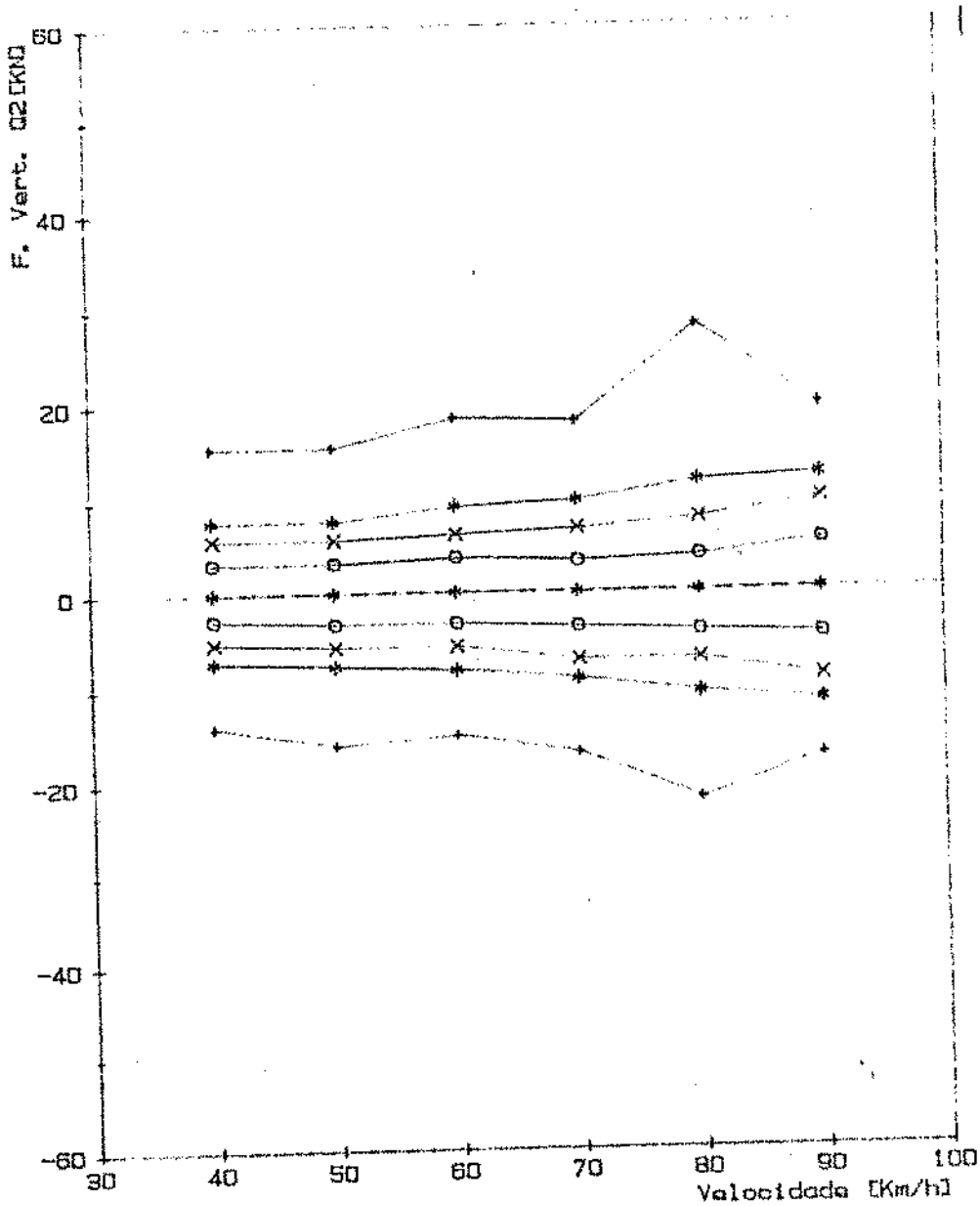
- \* - - - - \* VALOR MEDIO
- + - - - - + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* - - - - \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x - - - - x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o - - - - o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif.: SF 23,8,54

Figura 38 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99'e X 100% para força  $Q_2$  em função da velocidade para o truque FNV com C-PEP - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: fPQ2r  
Truque : fnvs- vazlo  
# Viagem :  
Configuracao : P  
Velocidade : [Km/h]  
Grandeza : Q2 [KN]



#### LEGENDA :

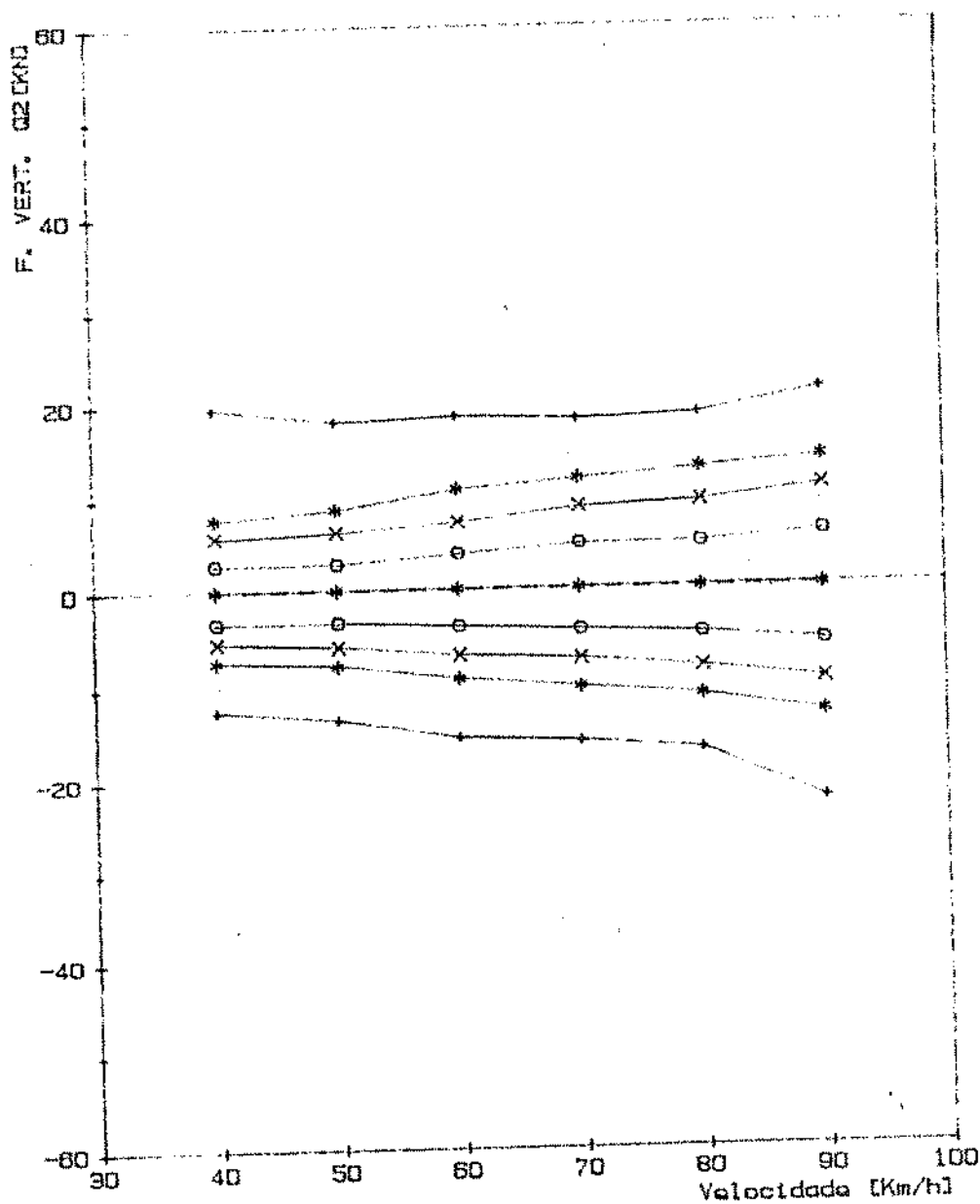
- \* VALOR MEDIO
- + LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif. 57 75 889

Figura 39 - Valores  $X_m$ , X 68, X 95, X 99 e X 100% para força  $Q_2$  em função da velocidade para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

### CRITERIO: VALORES DE PICO

Cod. da viagem: 1PQ2r  
 Truque : 1hb- vazio  
 # Viagem :  
 Configuracao : P  
 Velocidade : [Km/h]  
 Grandeza : Q2 [KN]



LEGENDA :

- \* - - - \* VALOR MEDIO
- + ———+ LIMITE P/ 100% DOS VALORES
- \* ———\* LIMITE P/ 99% DOS VALORES
- x ———x LIMITE P/ 95% DOS VALORES
- o ———o LIMITE P/ 68% DOS VALORES

Verif. ST 25.03.84

Figura 40 - Valores  $X_m$ ,  $X_{68}$ ,  $X_{95}$ ,  $X_{99}$  e  $X_{100\%}$  para força  $Q_2$  em função da velocidade para o truque LHB - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.

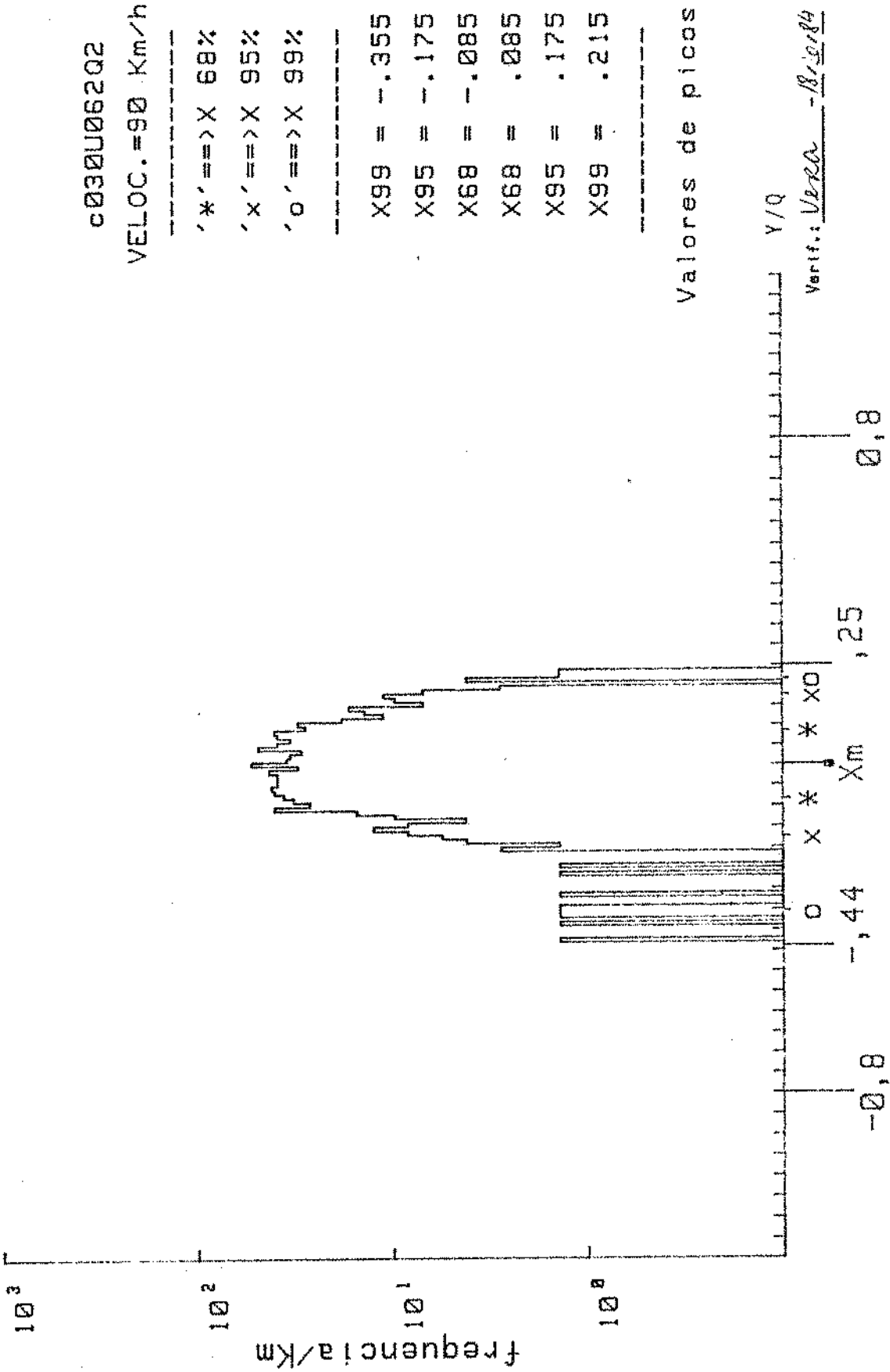


Figura 41 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarritamento  $Y_2/Q_2$  para o truque COBRASMA - Vagão Vazio - Configuração U - Trecho em Reta.

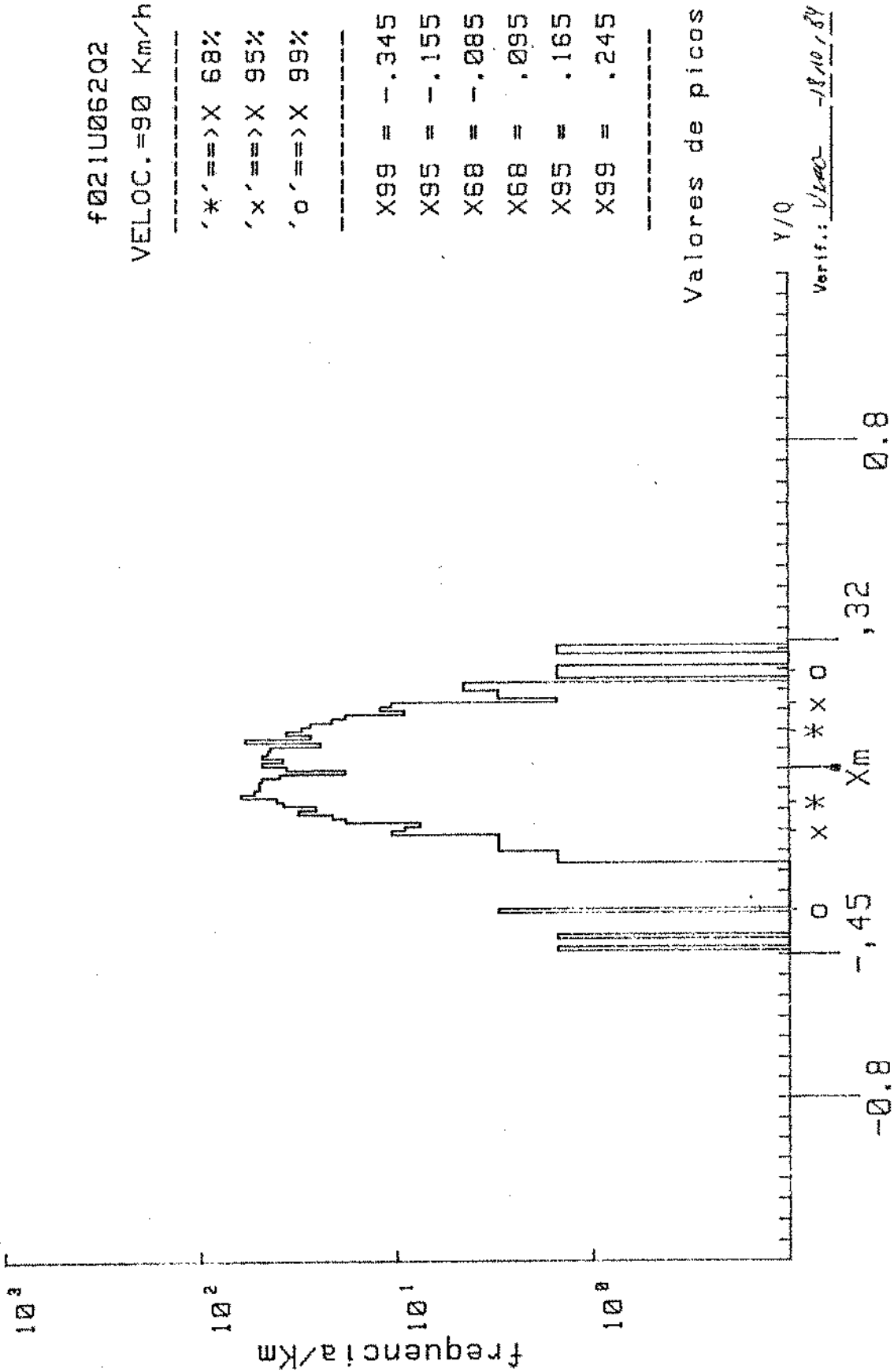


Figura 42 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV com C-PEP - Vagão Vazio - Configuração  
 U - Trecho em Reta.



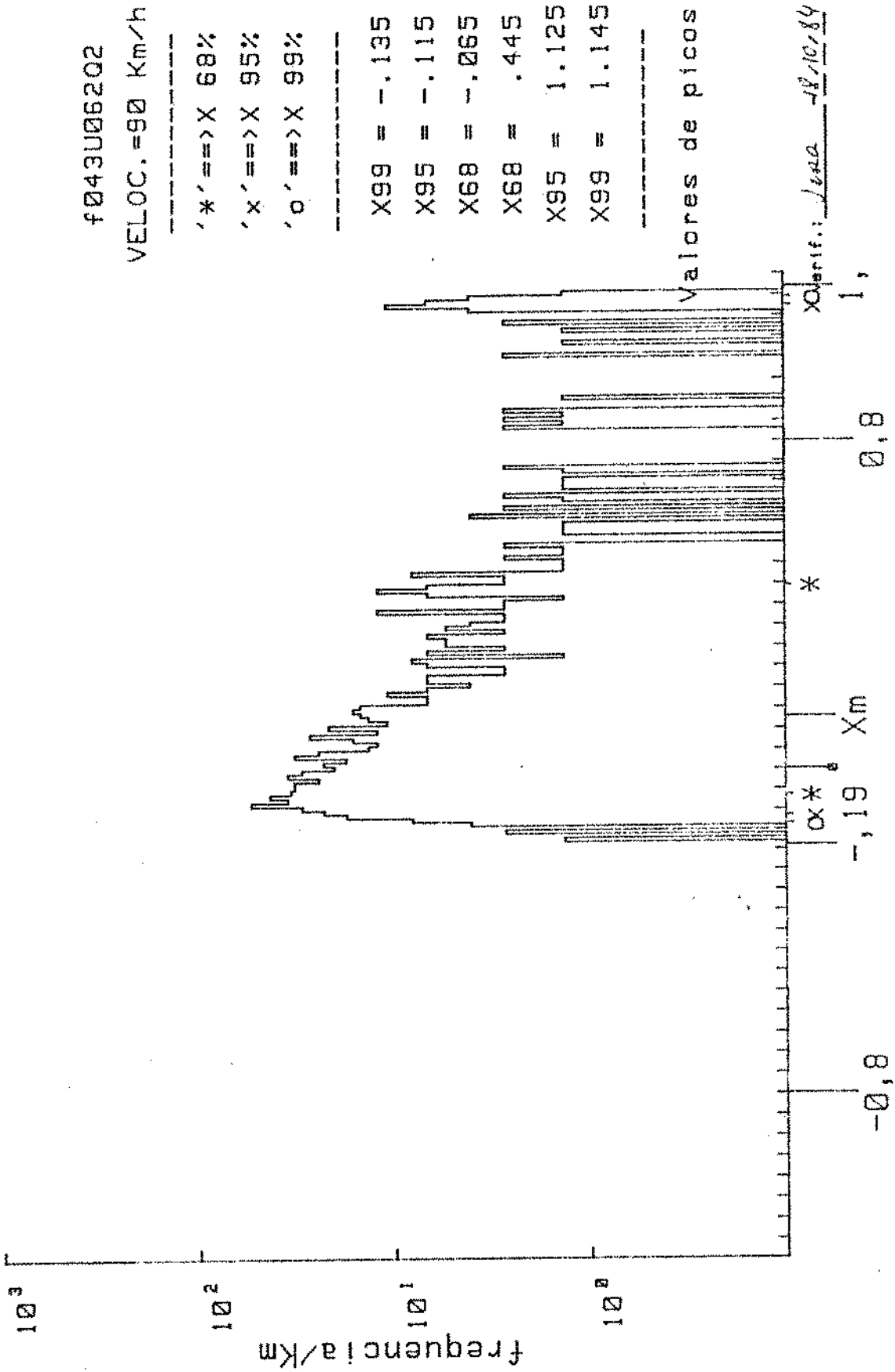


Figura 43 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilhamento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Vazio - Configuração U - Trecho em Reta.

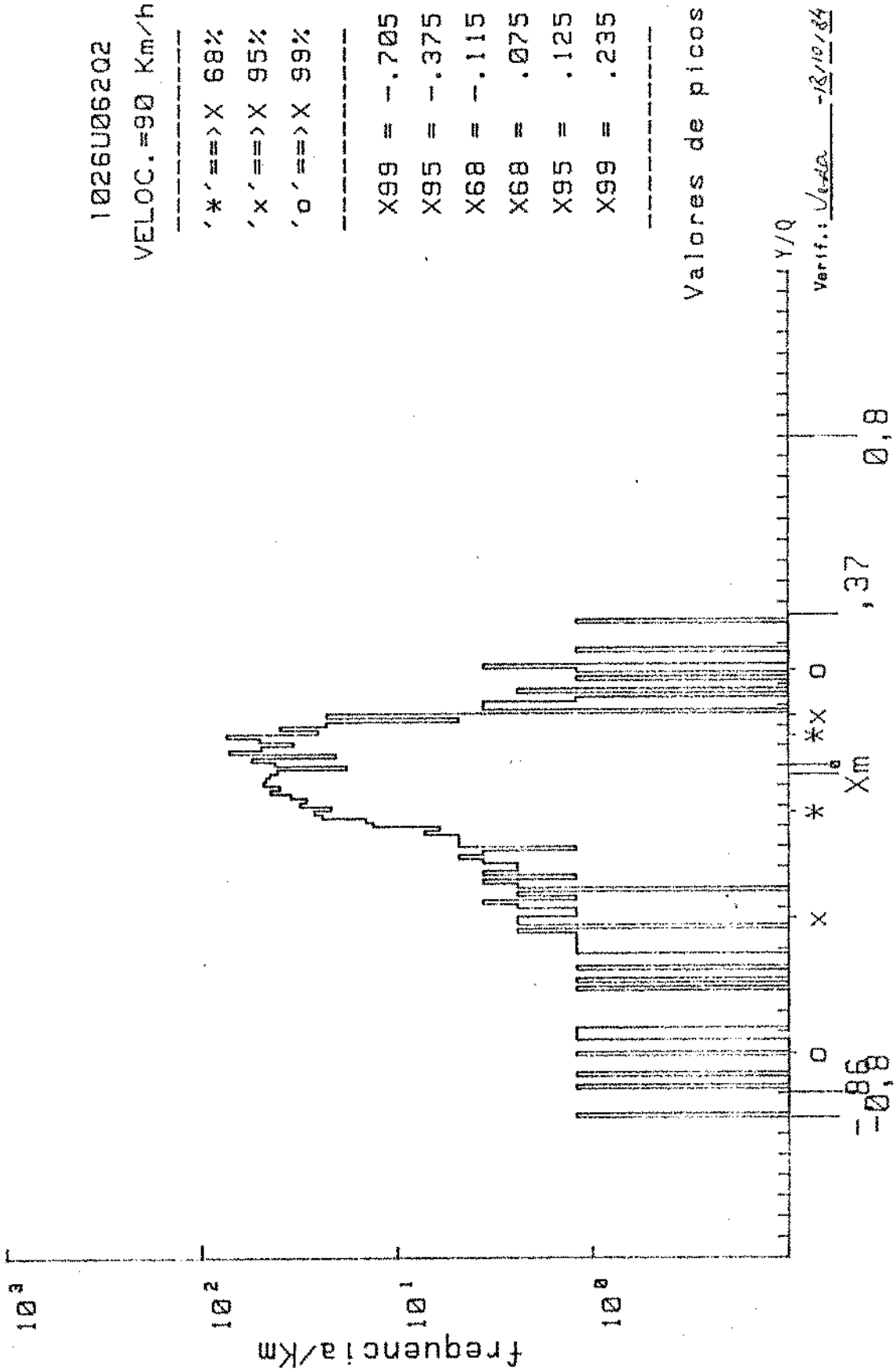


Figura 44 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque LHB - Vagão Vazio - Configuração U - Tre -  
 cho em Reta.

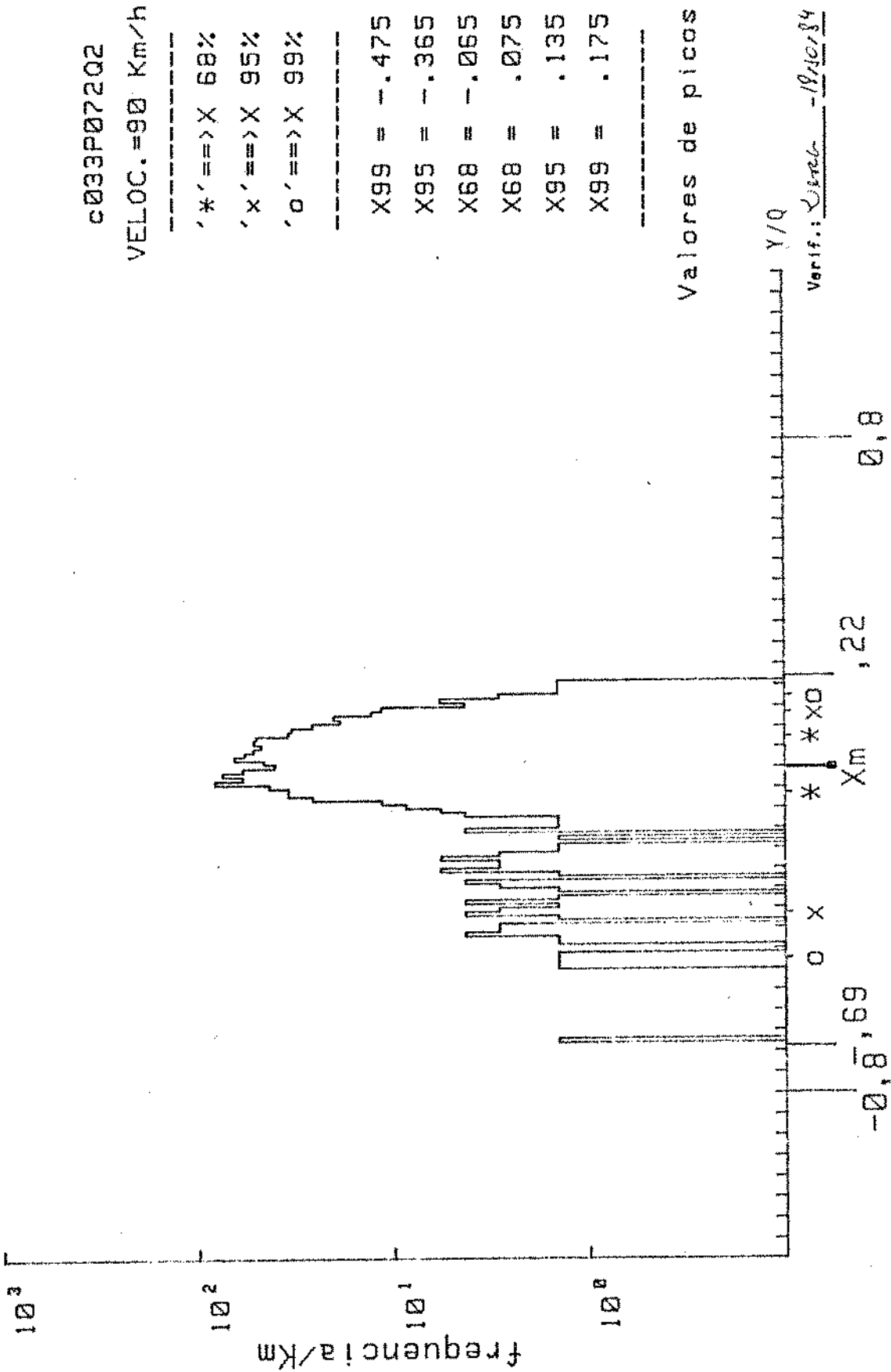


Figura 45 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque COBRASMA - Vagão Vazio - Configuração P -  
 Trecho em Reta.

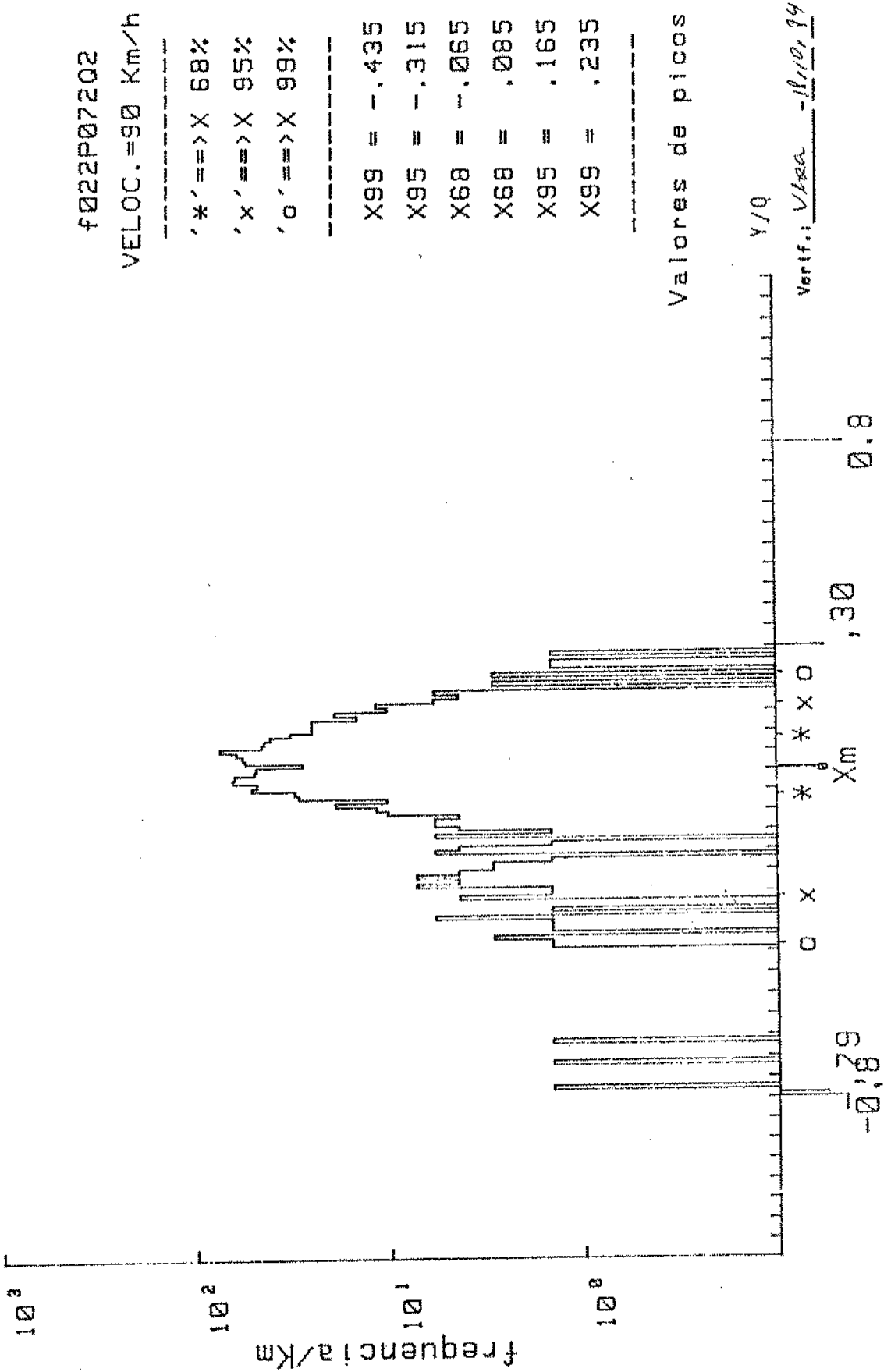


Figura 46 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV com C-PEP - Vagão Vazio - Configuração  
 P - Trecho em Reta.

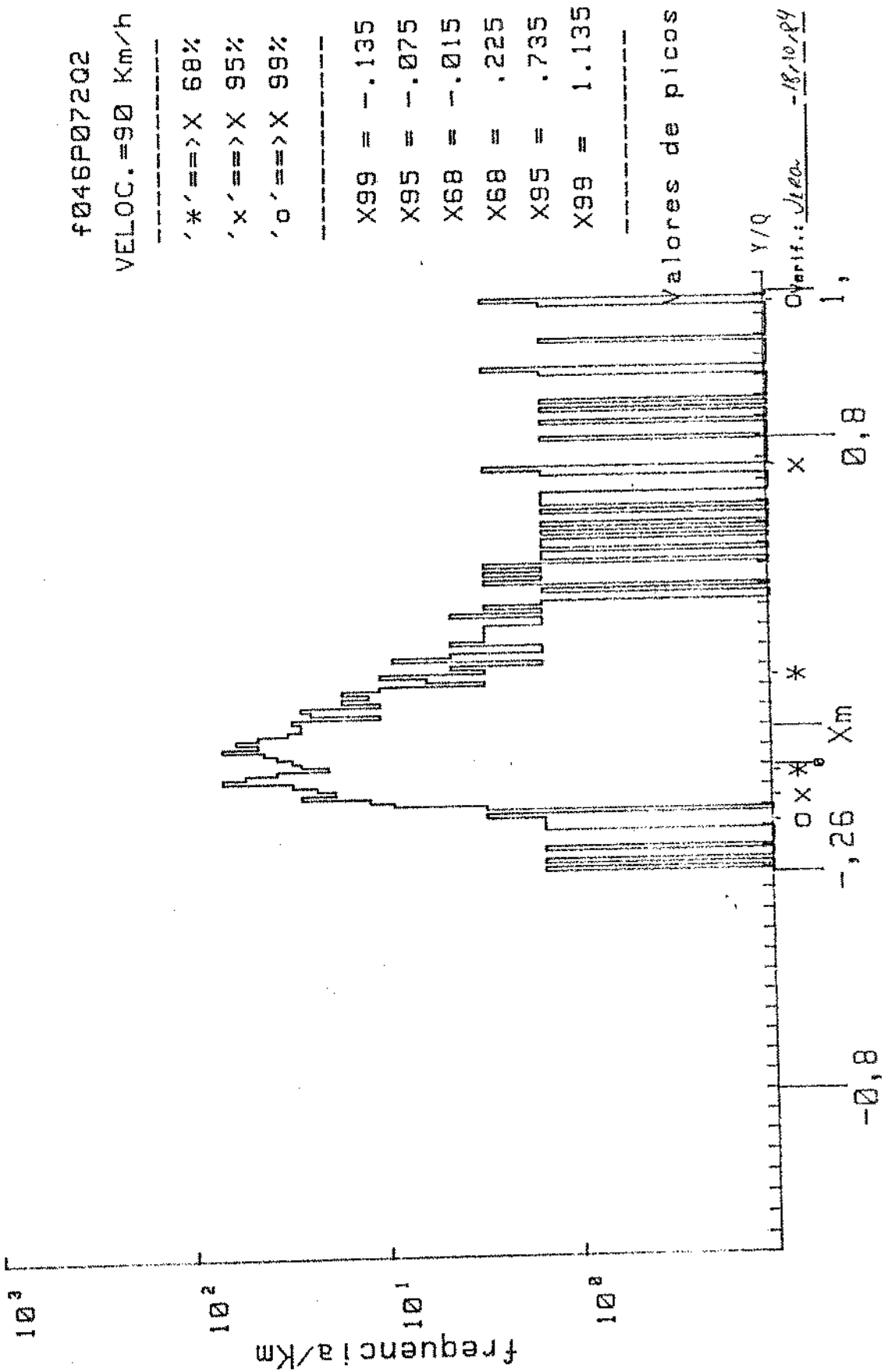


Figura 47 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Vazio - Configuração  
 P - Trecho em Reta.

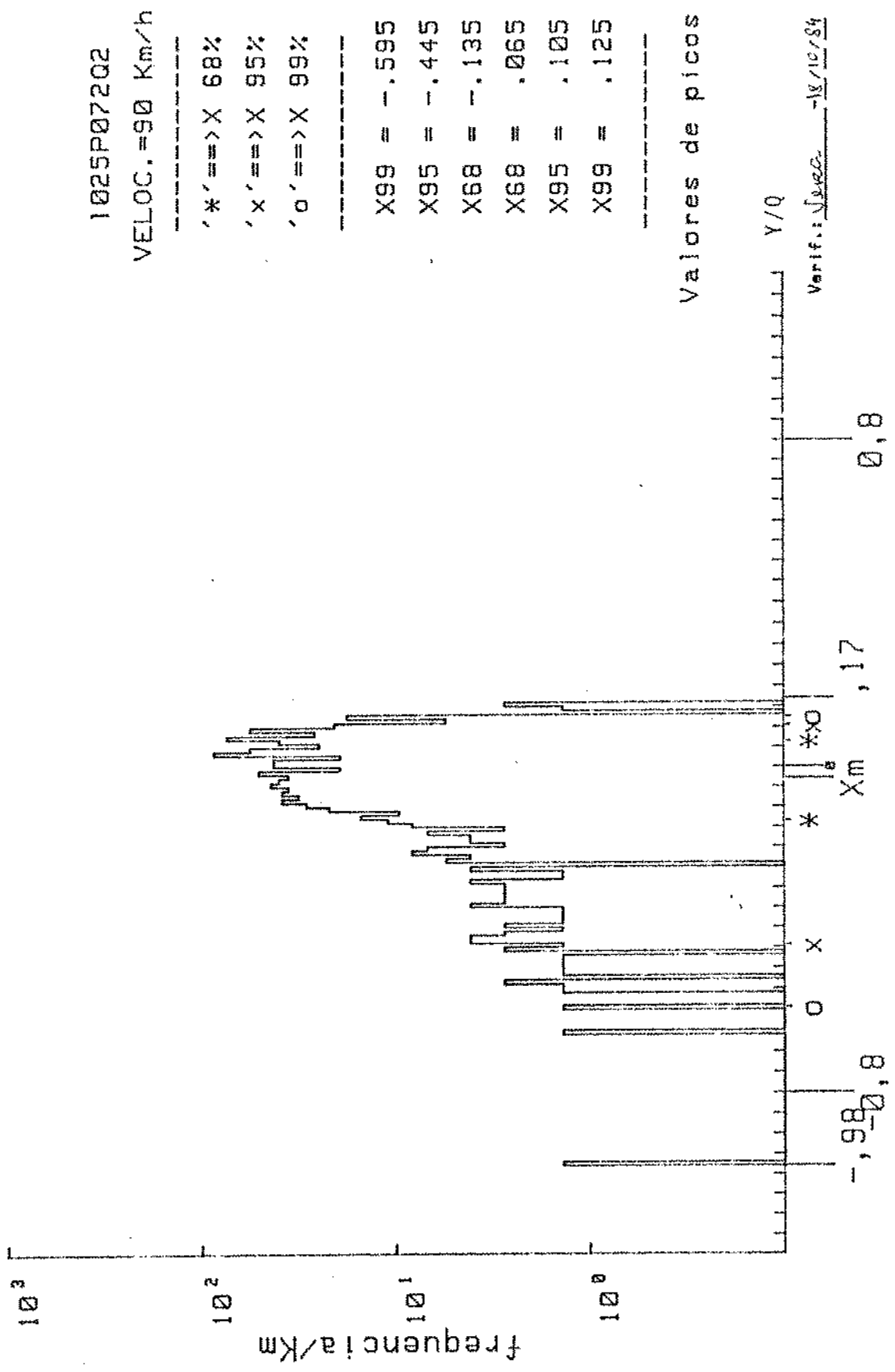


Figura 48 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de desaceleração  $Y_2/Q_2$  para o truque LHB - Vagão Vazio - Configuração P - Trecho em Reta.



C2556U06202

VELOC. = 70 Km/h

-----  
 ' \* ' ==> X 68%  
 ' x ' ==> X 95%  
 ' o ' ==> X 99%  
 -----

X99 = -.135  
 X95 = -.095  
 X68 = -.055  
 X68 = .055  
 X95 = .095  
 X99 = .135  
 -----

Valores de picos

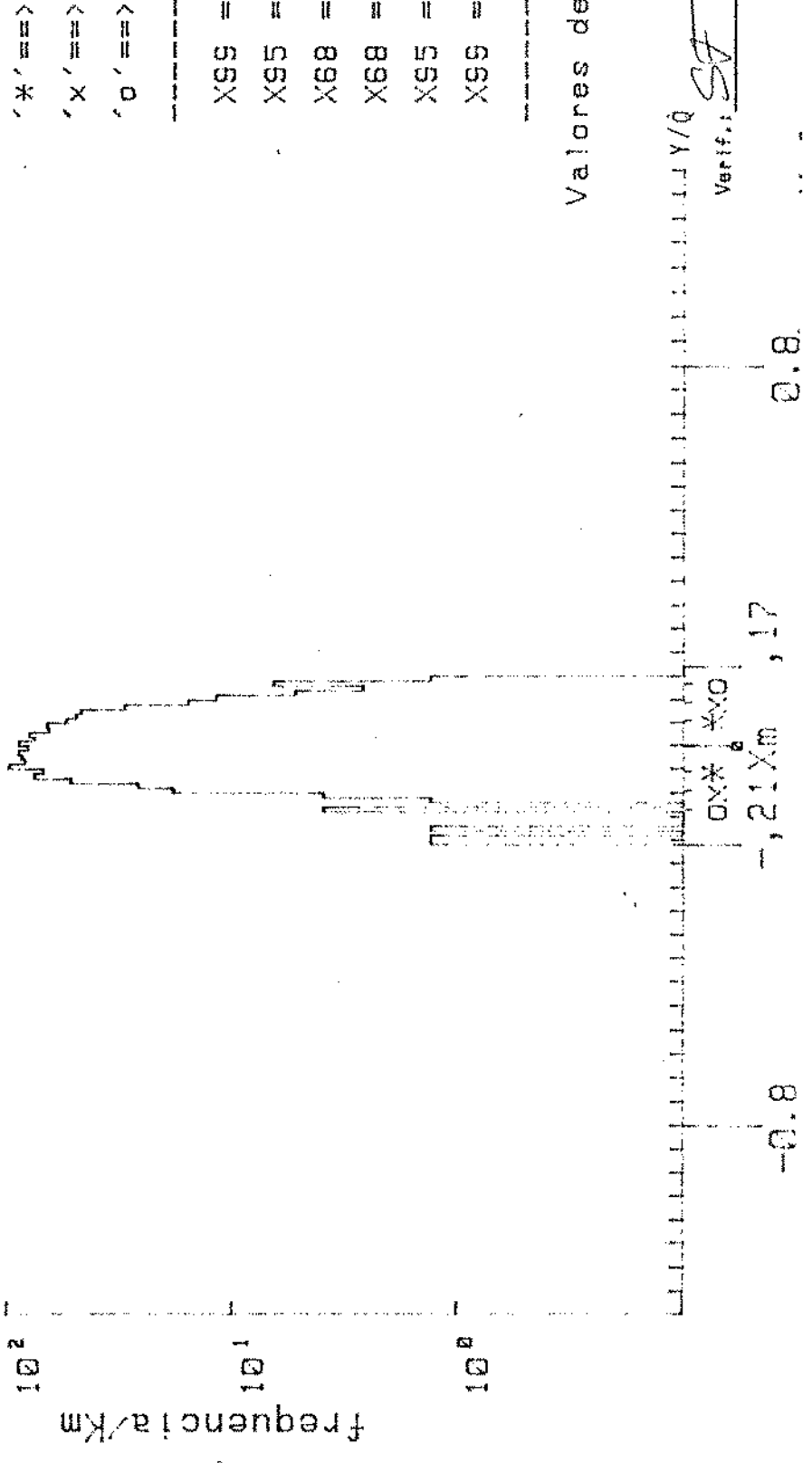


Figura 49 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque COBRASMA - Vagão Carregado - Configuração U-  
 Trecho em Reta.

F081UB62Q2

VELOC. = 70 Km/h

'\* '==>X 68%  
'x '==>X 95%  
'o '==>X 99%

X99 = -.175  
X95 = -.135  
X68 = -.065  
X68 = .015  
X95 = .045  
X99 = .085

Valores de picos

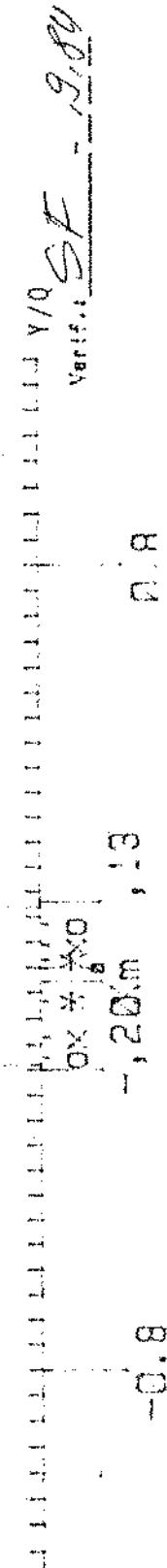
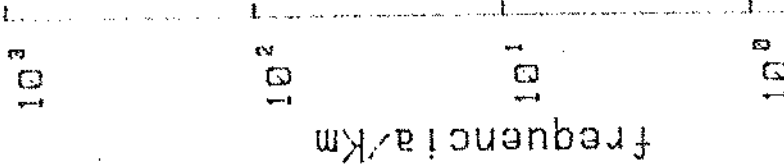


Figura 50 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarriha  
mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV com C-PEP - Vagão Carregado - Configura-  
ção U - Trecho em Reta.

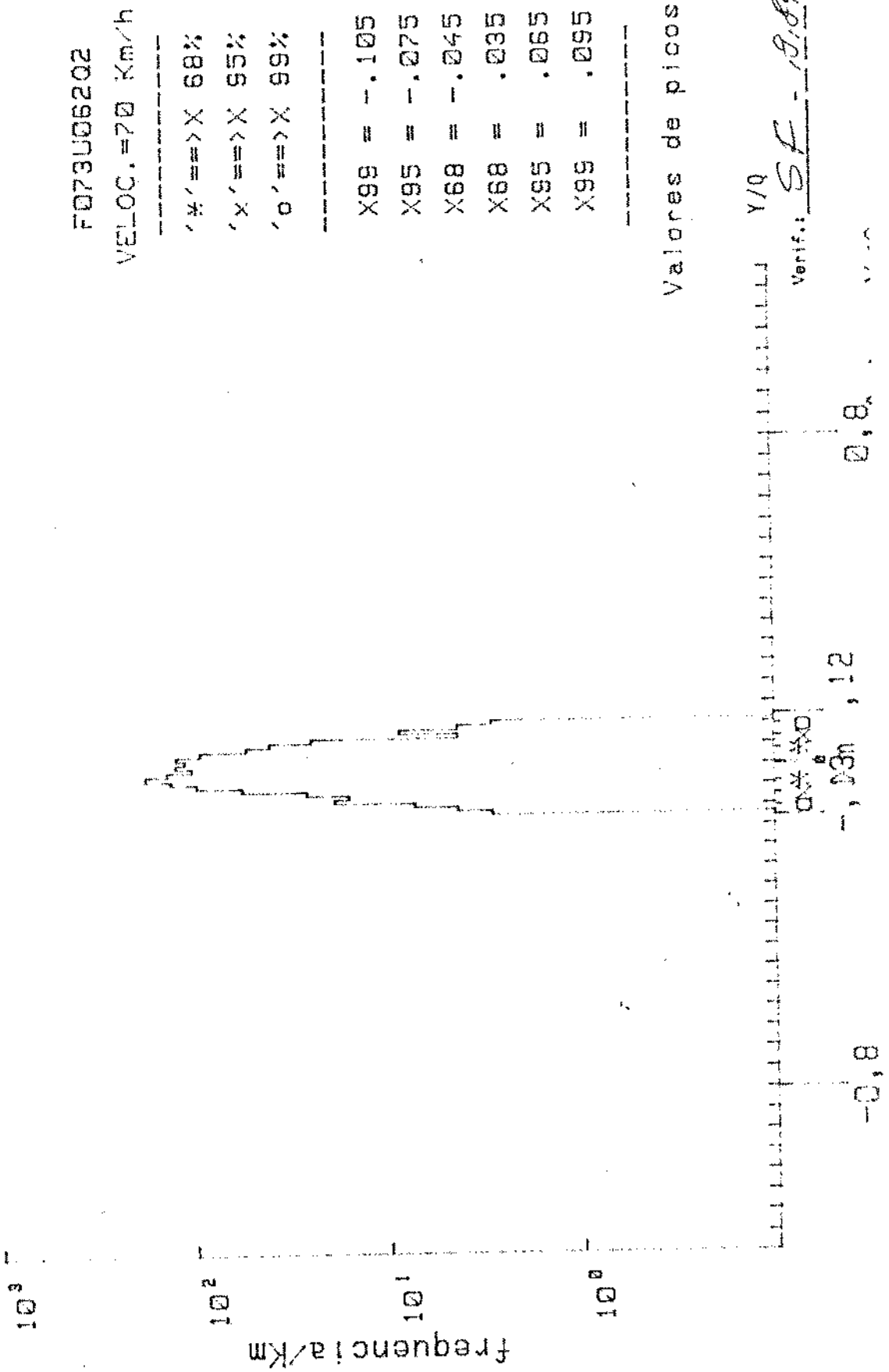


Figura 51 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Carregado - Configura-  
 ção U - Trecho em Reta.

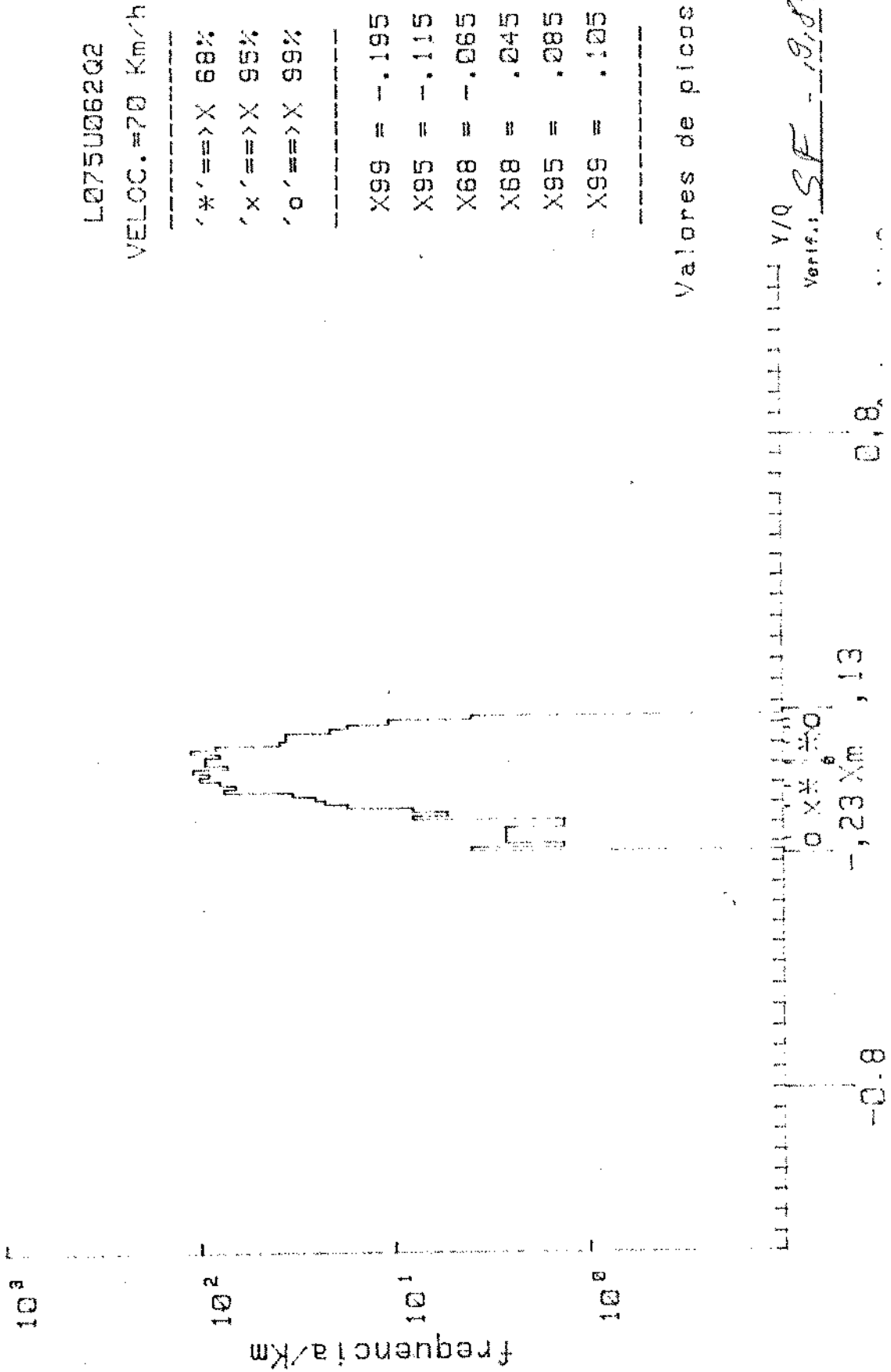


Figura 52 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilhamento  $Y_2/Q_2$  para o truque LHB - Vagão Carregado - Configuração U - Trecho em Reta.

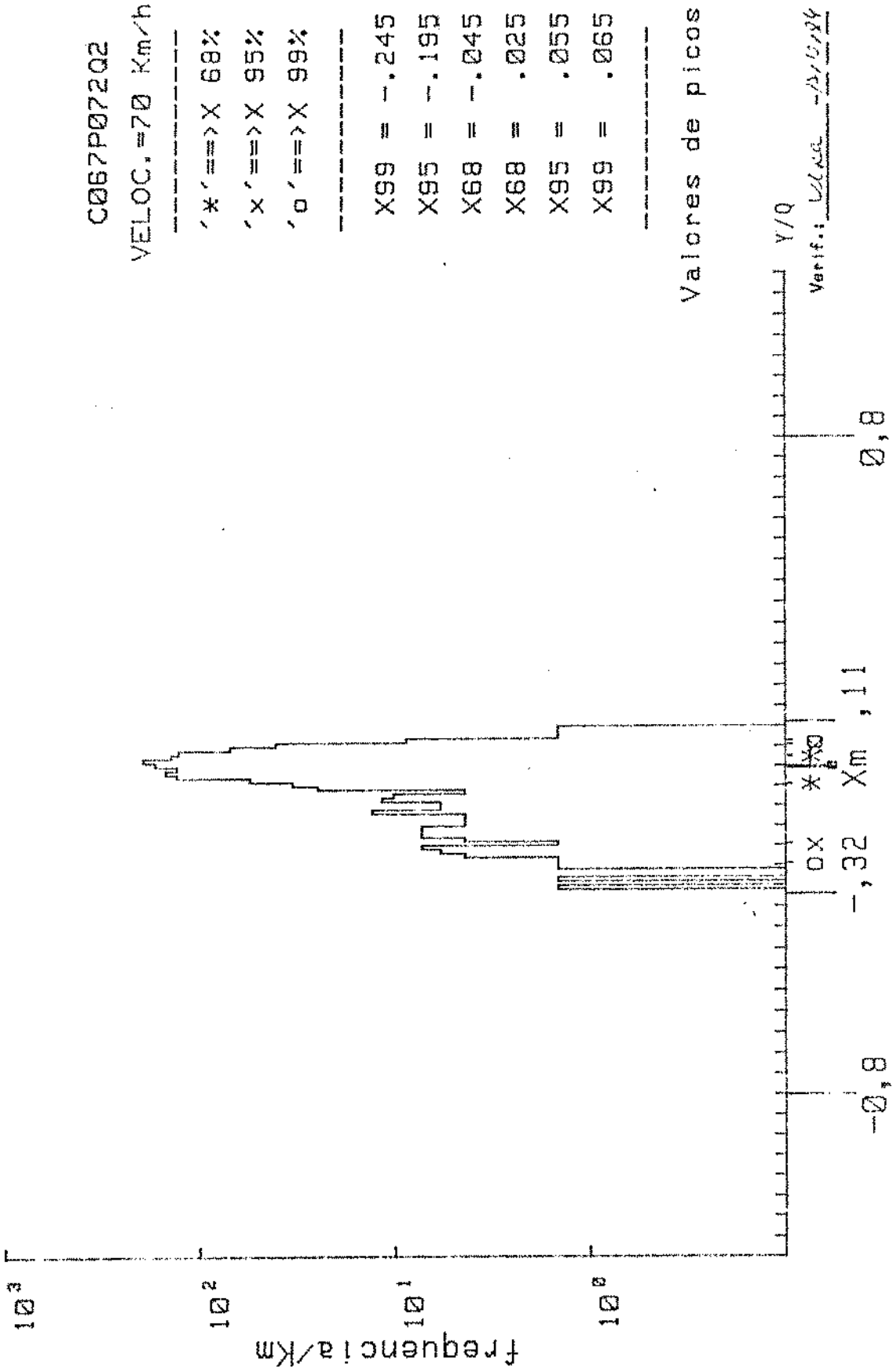


Figura 53 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque COBRASMA - Vagão Carregado - Configuração P  
 Trecho em Retá.

F082P07202

VELOC. = 70 Km/h

-----  
 ' \* ' ==> X 68%  
 ' x ' ==> X 95%  
 ' o ' ==> X 99%  
 -----

X99 = -.295  
 X95 = -.255  
 X68 = -.175  
 X68 = .025  
 X95 = .075  
 X99 = .105  
 -----

Valores de picos

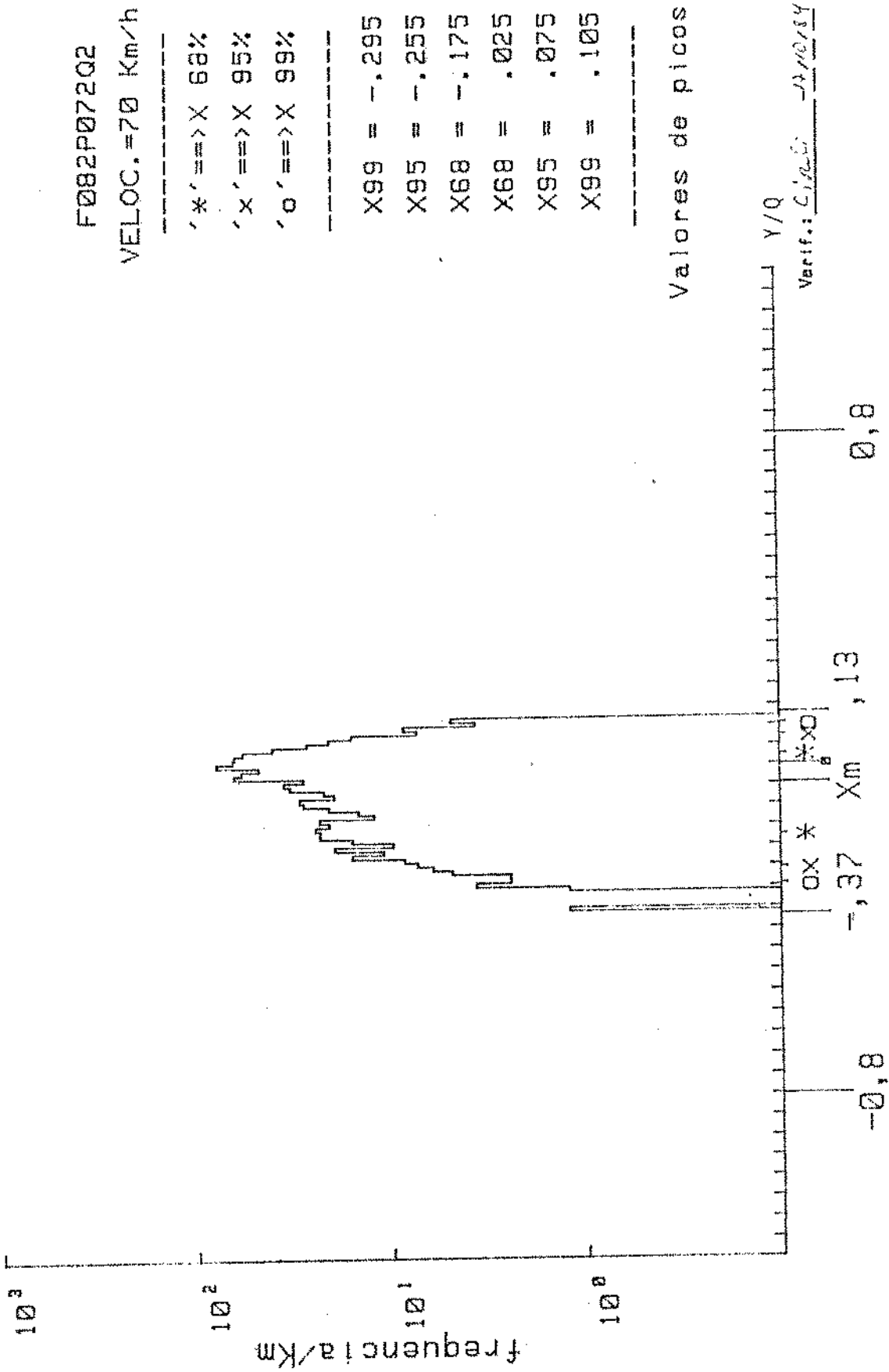


Figura 54 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV com C-PEP - Vagão Carregado - Configura-  
 ção P - Trechó em Retá.



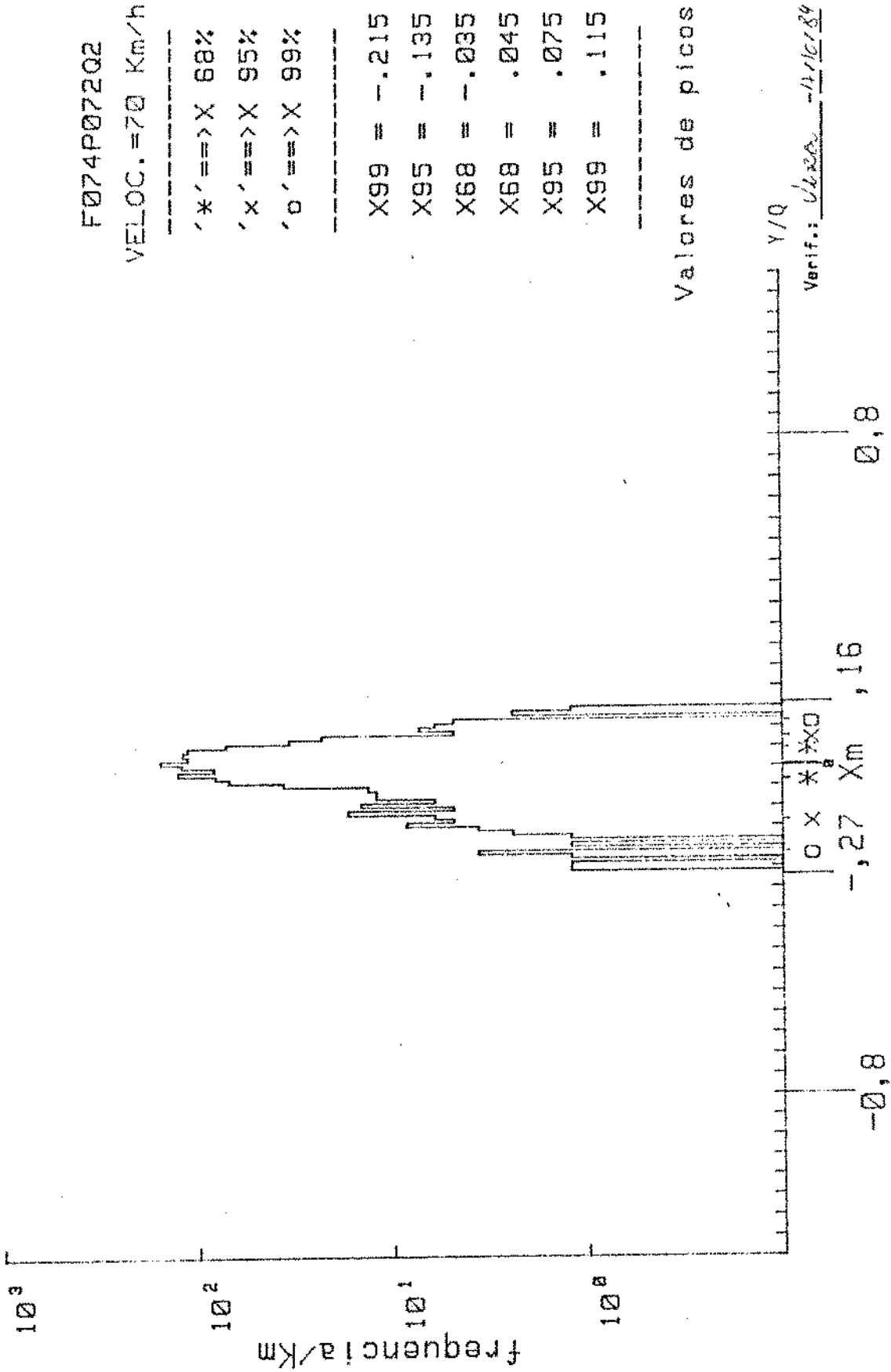
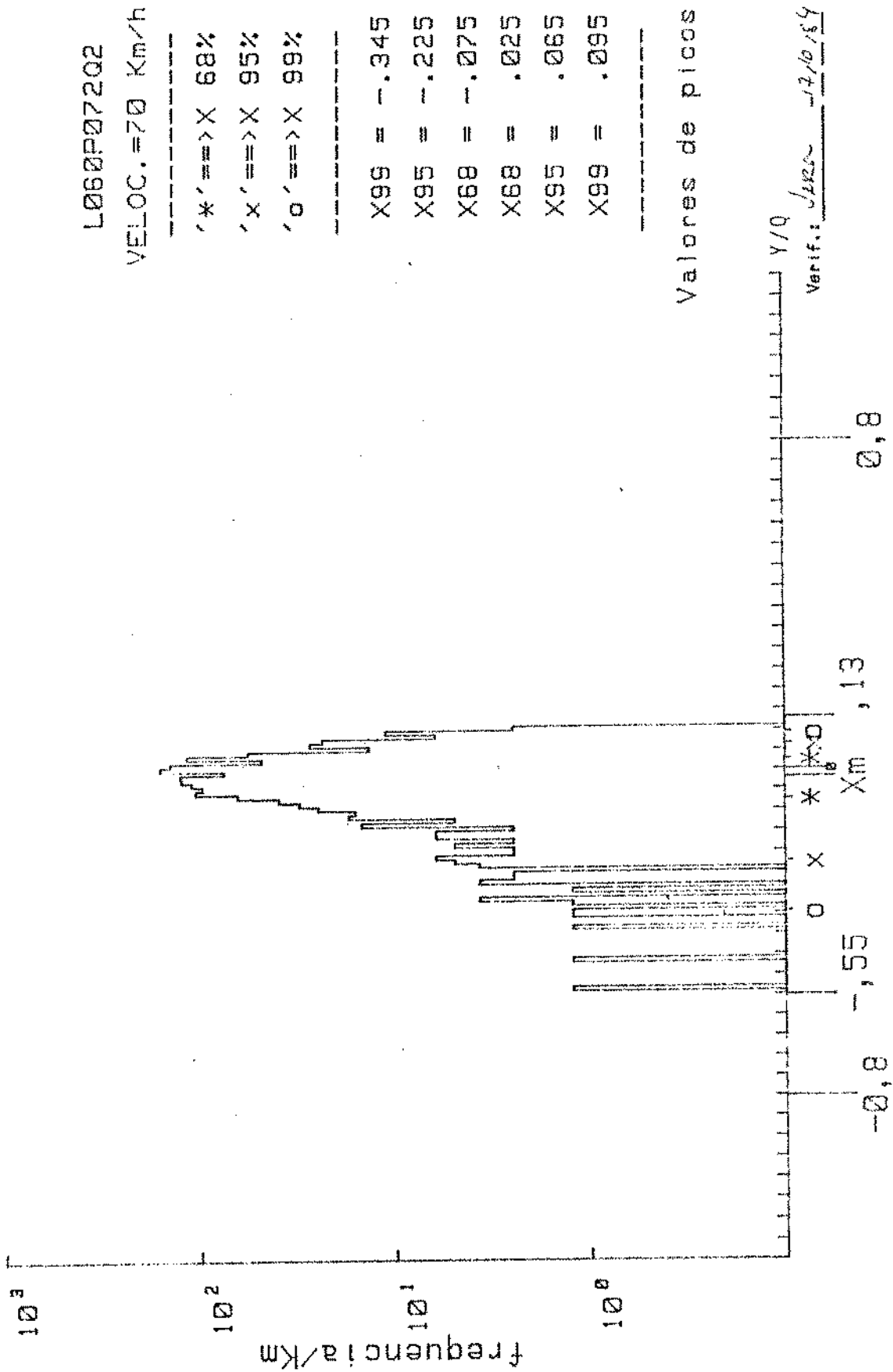


Figura 55 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilha-  
 mento  $Y_2/Q_2$  para o truque FNV sem C-PEP - Vagão Carregado - Configura-  
 ção P - Trêcho em Reta.



-----  
'\*'==>X 68%  
'x'==>X 95%  
'o'==>X 99%  
-----

X99 = -.345  
X95 = -.225  
X68 = -.075  
X68 = .025  
X95 = .065  
X99 = .095

-----

Figura 56 - Curva de distribuição de frequência para o coeficiente de descarrilha-  
mento  $Y_2/Q_2$  para o truque LHB - Vagão Carregado - Configuração P -  
Trecho em Reta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REDE FERROVIÁRIA FEDERAL - "Perfil longitudinal da linha".
- [2] SALES, L.H. - "Aparelhos de mudança de via". Engefer, Rio de Janeiro, 1982.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - "Aparelhos de mudança de via" - P.NB-518.
- [4] BERG, H. - "Radsatzwellenverfahren", Centro de Pesquisa de Minden, Alemanha, 1982.
- [5] ZEILHOFER, M; SUESMUTH, G. & PIWENITZKY, G - "Ermittlung der Kraefte zwischen Rad und Schiene aus der Biegedehnung der Radsatzwelle", Georg Siemens, Berlin, 1972.
- [6] OSTERMEYER, M; BERG, H. & ZUECK, H.- "Der heutige Entwicklungsstand der Messmethode". Radsatzwellenverfahren zur Bestimmung der Kraefte zwischen Rad und Schiene. Centro de Pesquisa de Minden, Alemanha, 1980.
- [7] ADAMS, P.- "Experimental stress analysis and motion measurement". Prentice Hall of India Ltd, Nova Delhi, 1965.
- [8] WICKENS, A. H. - "Neue Untersuchungen ueber Querschwingungen an Eisenbahnfahrzeugen fuer Hochgeschwindigkeiten", Symposium Schnellverkehr, Wien, 1968.
- [9] SPERLING, E. - "Neuere Erkenntnisse ueber den Lauf von Eisenbahnwagen". Carl Roehrig Verlag, Darmstadt, 1956.

- [10] BUSCHMANN, G.; SPERLING, E. - "Beitrag Frage des Schwingungsverhaltens von Fahrzeugen". Glasers Annalen, Heft 5, 1961.
- [11] FILHO, F., R. - "Estudo da estabilidade dinãmica de veiculos ferroviãrios atravẽs da simulaçãõ do comportamento de uma locomotiva". Deptº Engenharia Mecânica - FEC, UNICAMP, 1983.
- [12] JOLY, R. - "Untersuchungen der Querstabilitaet eines Eisenbahnfahrzeuges bei hohen Geschwindigkeiten". Schienen der Welt, Maerz, 1972.
- [13] KRUGMANN, H., L. - "Lauf der Schienenfahrzeuge im Gleis". R.Oldenbourg Verlag Muenchen Wien, 1982.
- [14] KLINGEL - "Ueber den Lauf von Eisenbahnwagen auf gera der Bahn", Organ, 1883.
- [15] KIK, W.; R., KNOTHE, K. - "Beeinflussung der Grenzgeschwindigkeit von Radsaetzen durch Federung und Daempfung in Laengs- und Querrichtung" - VDI-Bericht Nr. 221, 1974.
- [16] GASCH, R.; KIK, W., KNOTHE, K. - "Passives Hilfssystem zur Erhoehung der Grenzgeschwindigkeit des stabilen Radsatzlaufes". VDI-Bericht Nr.221, 1974.
- [17] NEFZGER, A. - "Geometrie der Beruehrung zwischen Radsatz und Gleis". ETR-Eisenbahn Technischen Rundschau, 1974.
- [18] MADEYSKI - "Laufwerktechnik, Teil " - Deutsche Bundesbahn, 1974.
- [19] HEUMANN - "Lauf von Eisenbahnfahrzeugen mit zwei ohne Spiel gelagerten Radsaetzen beliebiger Belastung in der Gerade". Organ, 1940.

- [20] "ZULAESSIGE HOECHSTWERTE der Y- und Q-Kraefte und Ortgleisungskriterium", ORE, 1984.
- [21] "ENTGLEISUNG von Gueterwagen im Gleisverwindung".
- [22] PRUD'HOMME - "Der Widerstand des Gleises gegen die von den Fahrzeugen ausgehende seitliche Beanspruchung Internationale Eisenbahnkongressvereinigung" 44 Heft 8/9 Seiten 577 - 614, 1967.
- [23] DEUTSCHE NORMEN - "Klassierverfahren" - DIN 45 667.
- [24] STROTHMANN, W. - "Horizontale Stoerfunktion eines Gleis". 1974.
- [25] KRETSCHMER, R., M. - "Beitrag zur Synthetisierung von Lastkollektiven zur Bemessung der Laufwerke von Schienen", 1983.
- [26] HENNING, H.J.; STANGE, K. - "Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik". Springer Verlag, Berlin, 1966.
- [27] KENDALL, M. - "Rank Correlation Methods". Charles Griffin & Company Ltd., London, 1974.

SIMBOLOGIA

- A Plano de medição do rodeiro instrumentado
- $A_1$  Ponto de contato entre roda e trilho para a roda 1
- $A_2$  Ponto de contato entre roda e trilho para a roda 2
- $\bar{A}_1$  Ponto utilizado no eixo para a calibração do rodeiro instrumentado através da força  $F_{1K}$
- $\bar{A}_2$  Ponto utilizado na roda 1 para a calibração do rodeiro instrumentado através da força  $F_{2K}$
- $\bar{A}_3$  Ponto utilizado na roda 2 para a calibração do rodeiro instrumentado através da força  $F_{2K}$
- $\bar{A}_4$  Ponto utilizado no eixo para a calibração do rodeiro instrumentado através da força  $F_{3K}$
- a Metade da distância entre os eixos do truque
- $a_1$  Distância entre o ponto  $\bar{A}_1$  ao plano A
- $a_2$  Distância entre o ponto  $\bar{A}_1$  ao plano B
- $a_3$  Distância entre o ponto  $\bar{A}_2$  ou  $\bar{A}_3$  ao eixo do rodeiro
- $a_4$  Distância entre o ponto  $\bar{A}_4$  ao plano E
- $a_5$  Distância entre o ponto  $\bar{A}_4$  ao plano F
- $a_h$  Aceleração lateral do rodeiro
- B Plano de medição do rodeiro instrumentado
- $B_1$  Aceleração lateral da estrutura do 19 truque
- $B_2$  Aceleração lateral da estrutura do 29 truque
- $B_3$  Aceleração lateral da estrutura do 39 truque



- $B_4$       Aceleração lateral da estrutura do 4º truque
- $B_r$       Aceleração lateral na extremidade da caixa de rolamento 1
- BH      Aceleração lateral da caixa do vagão
- BV      Aceleração vertical da caixa do vagão
- $b_1$       Distância do centro do rodeiro ao plano A
- $b_2$       Distância do centro do rodeiro ao plano B
- $b_3$       Distância do centro do rodeiro ao plano C
- $b_4$       Distância do centro do rodeiro ao plano D
- $b_5$       Distância do centro do rodeiro ao plano E
- $b_6$       Distância do centro do rodeiro ao plano F
- $b_{A1}$       Distância do centro do rodeiro ao ponto de contato da roda 1
- $b_{A2}$       Distância do centro do rodeiro ao ponto de contato da roda 2
- $b_{x1}$       Distância do centro do rodeiro a força de mancal  $F_{x1}$
- $b_{x2}$       Distância do centro do rodeiro a força de mancal  $F_{x2}$
- $b_{z1}$       Distância do centro do rodeiro a força de mancal  $F_{z1}$
- $b_{z2}$       Distância do centro do rodeiro a força de mancal  $F_{z2}$
- C      Plano de medição do rodeiro instrumentado
- $\bar{C}$       Matriz de amortecimento
- D      Plano de medição do rodeiro instrumentado
- $d_i$       Desvio da soma em relação a sua média M

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| $d_{x1}$  | Deslocamento relativo longitudinal da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado   |   |
| $d_{x2}$  | Deslocamento relativo longitudinal da caixa de rolamento 2 do rodeiro instrumentado   |   |
| $d_{x12}$ | Deslocamento relativo longitudinal do centro do rodeiro instrumentado   |   |
| $d_{y1}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado  | 1 |
| $d_{y2}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 2º rodeiro do 1º truque  | 2 |
| $d_{y3}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 1º rodeiro do 2º truque  | 3 |
| $d_{y4}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 2º rodeiro do 2º truque  | 4 |
| $d_{y5}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 1º rodeiro do 3º truque  | 5 |
| $d_{y6}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 2º rodeiro do 3º truque  | 6 |
| $d_{y7}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 1º rodeiro do 4º truque  | 7 |
| $d_{y8}$  | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento do 2º rodeiro do 4º truque  | 8 |
| $d_{y21}$ | Deslocamento relativo lateral da caixa de rolamento 1 medido em relação a um ponto distinto ao utilizado na grandeza $d_{y1}$ | 1 |
| $d_{z1}$  | Deslocamento relativo vertical da caixa de rolamento 1 do rodeiro instrumentado   | 1 |
| E         | Plano de medição do rodeiro instrumentado e também módulo de elasticidade do aço  |   |
| $e_{y1}$  | Deslocamento transversal relativo da travessa em relação $\tilde{a}$ lateral 1  |   |
| $e_{y2}$  | Deslocamento transversal relativo da travessa em relação $\tilde{a}$ lateral 2  |   |

|          |   |
|----------|---|
| $e_{z1}$ | Deslocamento vertical relativo da travessa em relação à lateral 1 |
| $e_{z2}$ | Deslocamento vertical relativo da travessa em relação à lateral 2 |
| F        | Plano de medição do rodeiro instrumentado                         |
| $F_1$    | Matriz de proporcionalidade para $\dot{Z}$                        |
| $F_2$    | Matriz de proporcionalidade para Z                                |
| $F_{x1}$ | Força radial longitudinal do mancal 1                             |
| $F_{x2}$ | Força radial longitudinal do mancal 2                             |
| $F_{y1}$ | Força axial do mancal 1   |
| $F_{y2}$ | Força axial do mancal 2   |
| $F_{z1}$ | Força radial vertical do mancal 1                                 |
| $F_{z2}$ | Força radial vertical do mancal 2                                 |
| $F_{1K}$ | Força para calibração dos planos A e B                            |
| $F_{2K}$ | Força para calibração dos planos C e D                            |
| $F_{3K}$ | Força para calibração dos planos E e F                            |
| $F(s)$   | Função resposta   |
| $f_0$    | Frequência natural vertical do vagão vazio                        |
| $f'_0$   | Frequência natural vertical do vagão carregado                    |
| f        | Frequência do movimento de auto-excitação                         |
| $f(t')$  | Grandeza f em função do tempo                                     |
| G        | Peso próprio do rodeiro   |

|           |  |
|-----------|--|
| H         | Força horizontal no rodeiro  |
| K         | Representação do fator do extensômetro                                   |
| $\bar{K}$ | Matriz de rigidez  |
| $K_1$     | Fator do extensômetro para a ponte 1                                     |
| $K_2$     | Fator do extensômetro para a ponte 2                                     |
| $K_A$     | Fator do extensômetro para o plano A                                     |
| $K_B$     | Fator do extensômetro para o plano B                                     |
| $K_C$     | Fator do extensômetro para o plano C                                     |
| $K_D$     | Fator do extensômetro para o plano D                                     |
| $K_E$     | Fator do extensômetro para o plano E                                     |
| $K_F$     | Fator do extensômetro para o plano F                                     |
| $K_{i1}$  | Fatores dos extensômetros situados no eixo $x'$                          |
| $K_{i2}$  | Fatores dos extensômetros situados no eixo $z'$                          |
| k         | Constante de mola do pacote de molas                                     |
| $L_1$     | Comprimento de onda do movimento de auto-excitação do rodeiro livre      |
| $L_2$     | Comprimento de onda do movimento de auto-excitação para um truque rígido |
| M         | Média da soma do cálculo de Kendall                                      |
| $\bar{M}$ | Matriz de massa  |
| $M_{Ax}$  | Momento fletor no plano A do rodeiro                                     |
| $M_{Bx}$  | Momento fletor no plano B do rodeiro                                     |

|          |   |
|----------|---|
| $M_{Cx}$ | Momento fletor no plano C do rodeiro  |
| $M_{Dx}$ | Momento fletor no plano D do rodeiro  |
| $M_{Ex}$ | Momento fletor no plano E do rodeiro  |
| $M_{Fx}$ | Momento fletor no plano F do rodeiro  |
| $M'_x$   | Componente do momento do mancal 1 do rodeiro                                    |
| $M'_z$   | Componente do momento do mancal 1 do rodeiro                                    |
| $M''_x$  | Componente do momento do mancal 2 do rodeiro                                    |
| $M''_z$  | Componente do momento do mancal 2 do rodeiro                                    |
| $M_{ix}$ | Momentos fletores em relação ao eixo x para os planos<br>$i = A, B, C, D, E, F$ |
| $M_{iz}$ | Momentos fletores em relação ao eixo z para os planos<br>$i = A, B, C, D, E, F$ |
| $m$      | Número de propriedades no processo de Kendall                                   |
| $m_o$    | Massa oscilante   |
| $N_1$    | Força normal no contato roda trilho para a roda 1                               |
| $N_2$    | Força normal no contato roda trilho para a roda 2                               |
| $n$      | Número de objetos no processo de Kendall  |
| OB1      | Objeto número 1 para as classificações parciais                                 |
| OB2      | Objeto número 2 para as classificações parciais                                 |
| OB3      | Objeto número 3 para as classificações parciais                                 |
| OB4      | Objeto número 4 para as classificações parciais                                 |
| P        | Ponto referido ao sistema móvel   |

- $P'$  Ponto referido ao sistema fixo do rodeiro
- $P_1$  Componente horizontal da força normal  $N_1$
- $P_2$  Componente horizontal da força normal  $N_2$
- $Q$  Força vertical de apoio e ponto referido ao sistema móvel
- $Q_1$  Força de apoio na roda 1
- $Q_2$  Força de apoio na roda 2
- $Q_{E1}$  Força vertical aplicada no banco de calibração do rodeiro na roda 1
- $Q_{E2}$  Força vertical aplicada no banco de calibração do rodeiro na roda 2
- $Q'$  Ponto referido ao sistema fixo no rodeiro
- $Q'_1$  Componente vertical da força  $N_1$
- $Q'_2$  Componente vertical da força  $N_2$
- $Q_0$  Força vertical estática de apoio
- $R_1$  Força resultante entre roda e trilho para a roda 1
- $R_2$  Força resultante entre roda e trilho para a roda 2
- $R$  Ponto referido ao sistema fixo no rodeiro
- $R'$  Ponto referido ao sistema móvel no rodeiro
- $r_0$  Raio de rolamento
- $r_1$  Raio de rolamento da roda 1
- $r_2$  Raio de rolamento da roda 2



|          |   |
|----------|---|
| S        | Ponto referido ao sistema móvel no rodeiro  |
| S'       | Ponto referido ao sistema fixo no rodeiro   |
| $S_0$    | Soma dos quadrados dos desvios em relação a média   |
| s        | Metade da distância entre os pontos de contato  |
| T        | Contribuição das repetições no processo de Kendall  |
| t        | Número de repetições das classificações parciais  |
| t'       | Tempo   |
| $T_{x1}$ | Força longitudinal entre roda e trilho na roda 1  |
| $T_{x2}$ | Força longitudinal entre roda e trilho na roda 2  |
| $U_0$    | Tensão de alimentação das pontes de Wheastone   |
| $U_1$    | Tensão elétrica medida para a ponte na direção $x'$   |
| $U_2$    | Tensão elétrica medida para a ponte na direção $z'$   |
| $U_{i1}$ | Tensões elétricas medidas para a ponte de Wheastone na direção $x'$ para os planos $i = A, B, C, D, E, F$ |
| $U_{i2}$ | Tensões elétricas medidas para a ponte de Wheastone na direção $z'$ para os planos $i = A, B, C, D, E, F$ |
| $U_A$    | Tensão elétrica medida no plano A na calibração estática  |
| $U_B$    | Tensão elétrica medida no plano B na calibração estática  |
| $U_C$    | Tensão elétrica medida no plano C na calibração estática  |
| $U_D$    | Tensão elétrica medida no plano D na calibração estática  |
| $U_E$    | Tensão elétrica medida no plano E na calibração estática  |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $U_F$                        | Tensão elétrica medida no plano F na calibração estatística   |
| V                            | Velocidade da composição  |
| X                            | Vetor de excitação  |
| $X_1$                        | Vetor de excitação proveniente do contato roda trilho   |
| $X_2$                        | Vetor de excitação proveniente do contato roda trilho   |
| $X(s)$                       | Função de perturbação da via  |
| $X_m$                        | Valor médio   |
| $X_{p\%}$                    | Valor tal que p% da totalidade dos valores a direita ou a esquerda da média $X_m$ estão compreendidos entre $X_p - X_m$ , para $p = 68, 95, 99$ e $100\%$ |
| x                            | Direção do movimento do rodeiro instrumentado   |
| $x_1^i, x_2^i, x_3^i, x_4^i$ | Posição dos extensômetros nos planos de medições do rodeiro instrumentado   |
| $x', y', z'$                 | Sistema fixo no rodeiro   |
| W                            | Representação dos módulos de resistência  |
| $W_i$                        | Módulos de resistência dos planos $i = A, B, C, D, E, F$  |
| $\bar{W}$                    | Coefficiente de concordância de Kendall   |
| Y                            | Força lateral de guia   |
| $Y_1$                        | Força lateral de guia da roda 1   |
| $Y_2$                        | Força lateral de guia da roda 2   |
| $Y_{E1}$                     | Força transversal aplicada no banco de calibração na roda 1   |

- $Y_{Ez}$  Força transversal aplicada no banco de calibração na ro  
da 2
- $Y(S)$  Função de transferência
- $y$  Direção do eixo do rodeiro
- $Z$  Vetor de estado
- $z_1, z_2, z_3, z_4$  posição dos extensômetros nos planos de medi-  
ção do rodeiro instrumentado
- $z$  Direção perpendicular a via
- $x$  Ângulo de giro do rodeiro
- $\gamma$  Ângulo de inclinação do perfil cônico da banda de rola-  
mento
- $\gamma_1$  Ângulo de inclinação do perfil da roda no ponto de con-  
tato para roda 1
- $\gamma_2$  Ângulo de inclinação do perfil da roda no ponto de con-  
tato para roda 2
- $\epsilon_{ijP'}$  Deformações no ponto  $P'$  para os planos  $i = A, B, C, D,$   
 $E, F$
- $\epsilon_{iQ'}$  Deformações no ponto  $Q'$  para os planos  $i = A, B, C, D,$   
 $E, F$
- $\mu_1$  Coeficiente de atrito no contato para a roda 1
- $\mu_2$  Coeficiente de atrito no contato para a roda 2
- $\rho_1$  Ângulo de atrito para o contato na roda 1
- $\rho_2$  Ângulo de atrito para o contato na roda 2
- $\sigma_{P'}$  Tensão na direção  $y$  no ponto  $P'$
- $\sigma_{Q'}$  Tensão na direção  $y$  no ponto  $Q'$
- $\sigma_P$  Tensão na direção  $y$  no ponto  $P$

$\sigma_Q$  Tensão na direção y do ponto Q

$\phi$  Deslocamento relativo angular do rodeiro instrumentado