UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

Este exemplar corresponde a redação final da Tese defendida pelo Eng. Augusto Cesar Carreiro de Oliveira e aprovada pela Comissão Julgadora, em 10/03/89.

Prof. Dr. Dino Federsi

DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES NA LATERAL DE UM TRUQUE FERROVIÁRIO

007/89

Engº Augusto Cesar Carreiro de Oliveira

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de: Mestrado

Título da Tese: Determinação dos níveis de tensões na lateral de um truque ferroviário

Autor: Engº Augusto Cesar Carreiro de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Dino Ferraresi

Aprovada por:

Prof. Dr. Dino Ferraresi - Presidente

Dr. Antonio Arlindo Guidetti Porto

Prof. Dr. Bernd Duwe

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

TESE DE MESTRADO

DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES NA LATERAL DE UM TRUQUE FERROVIÁRIO

AUTORIA

Engº AUGUSTO CESAR CARREIRO DE OLIVEIRA

ORIENTAÇÃO

Prof. Dr. DINO FERRARESI

REALIZAÇÃO

CENTRO DE TECNOLOGIA

DIVISÃO DE ENGENHARIA FERROVIÁRIA

Dedico este trabalho aos meus pais

. Alcino Onofre de Oliveira (in memorian) e

. Maria Thereza Carreiro de Oliveira, a quem devo, com muito orgulho, o alicerce para que eu atingisse mais um degrau da minha vida

A determinação de uma pessoa, torna fácil a transposição dos obstáculos encontrados no caminho que percorre para alcançar seus objetivos

AUGUSTO CESAR CARREIRO DE OLIVEIRA

AGRADECIMENTOS

Expresso com grande sinceridade, meus agradecimentos:

- ao Prof. Dr. Dino Ferraresi, que além de orientador desta tese, prestando a inestimável cooperação e assistência no desenvolvimento da mesma, também participou ativamente no trabalho que deu origem a ela, durante sua gestão como Superintendente do Centro de Tecnologia da UNICAMP;
- ao Dr. Antonio Arlindo Guidetti Porto, na qualidade de Chefe da Divisão de Engenharia Ferroviária, atuando ainda como executor responsável pelos testes de campo, além de participar no desenvolvimento deste trabalho;
- ao Dr. Ing. Ernest Detleve Egge, da Germanischer LLoyd, que colaborou de forma decisiva na realização do cálculo computacional;
- aos funcionários do Centro de Tecnologia que participaram direta ou indiretamente nos trabalhos de medições, confecção de dispositivos e execução dos testes;
- aos engenheiros João Batista Kimura Filho, Edson José de Oliveira e Rodolfo Décio Ferreira, ao técnico Paulo Soares de Moura, ao Econ. Fleury Cardoso da Cunha e a Secretária Executiva Vânia Maria Tonin, que colaboraram de maneira inestimável;
- às entidades, Companhia Vale do Rio Doce, Rede Ferroviária Federal S/A, Deutsche Eisenbahn Consulting (DEC) e Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammen Arbeit (GTZ), pela colaboração tanto técnica como financeira.

RESUMO

O presente trabalho trata da determinação dos níveis de tensões nas laterais de truques ferroviários, tanto modelo " Ride Control" como o modelo "Barber", sob a ação de cargas estáticas .

Neste sentido, foram adotados três procedimentos, um teórico, que constou da teoria dos elementos finitos, e dois experimentais, que constaram da técnica da extensometria aplicada em testes de campo e ensaios em laboratório.

De posse dos resultados obtidos, foram determinados os níveis de tensões na lateral para cada um dos procedimentos utilizados.

Após isto, foi realizada a determinação dos pontos críticos da estrutura. Além disso, foi feita a comparação dos resultados, obtidos através dos três procedimentos utilizados.

Assim sendo, foram tiradas conclusões muito importantes , tanto em relação aos níveis de tensões na estrutura, como também na comparação dos três procedimentos.

SUMMARY

This study deals with the determination of stress level on side parts of railway boogies when submitted to static loads . Both "Ride Control" and "Barber" designs have been analysed.

The work proceeds with two different points of view : a theoretical one - using the "Finite Elements Theory" - and an experimental one - using "Strain-Gages" technics. On the experimental part stress data have been gathered during actual field test travels. A second set of experimental stress data has been measured while the boogie's side parts were submitted with static loading on the laboratory.

With the three different methods the critical sections of the structure were determined. Some interesting conclusions arise from this determination as well as from the comparison of the different methods.

I N D I C E

AGRADECIMENTOS V
RESUMO VI
SUMMARY VII
INDICE VIII

I- INTRODUÇÃO 1
II- DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL 5
III- DETERMINAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS DA ESTRUTURA ATRAVÉS DA TEORIA DOS ELEMENTOS FINITOS 6
3.1- DESCRIÇÃO SUCINTA DO MÉTODO UTILIZADO 6
3.2- DETERMINAÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL 7
3.3- CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO E DE FIXAÇÃO DO MODELO ... 9
3.4- CONSTRUÇÃO DA MALHA DE NÓS DOS ELEMENTOS FINITOS ... 11
3.5- REALIZAÇÃO DO CÁLCULO COMPUTACIONAL E RESULTADOS OBTIDOS 13
IV- DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES NAS LATERAIS DO TRUQUE DURANTE TESTES EM CAMPO 18
4.1- DESCRIÇÃO SUCINTA DA METODOLOGIA UTILIZADA 18
4.2- ESCOLHA DOS TRECHOS DE VIA PARA A REALIZAÇÃO DAS VIAGENS 18
4.3- ESCOLHA DOS PONTOS PARA A APLICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS E DISTRIBUIÇÃO DOS MESMOS NAS LATERAIS DO TRUQUE 19
4.4- REALIZAÇÃO DOS TESTES DE CAMPO E RESULTADOS OBTIDOS . 23
V- DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES NA LATERAL DO TRUQUE ATRAVÉS DO ENSAIO ESTÁTICO 28
5.1- DESCRIÇÃO SUCINTA DO ENSAIO ESTÁTICO 28
5.2- ESCOLHA DOS PONTOS PARA A APLICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS E DISTRIBUIÇÃO DOS MESMOS NA LATERAL 28
5.3- MONTAGEM DA LATERAL NO BANCO DE ENSAIOS 33
5.4- EXECUÇÃO DOS TESTES 36
VI- ANÁLISE DOS RESULTADOS 39
6.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS 39
6.2- ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO A INTENSIDADE DAS TENSÕES 39
6.3- DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DA ESTRUTURA 40
6.4- COMPARAÇÃO DOS TRÊS PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES 41

VII- CONCLUSÕES 45
7.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS 45
7.2- NÍVEIS DE TENSÕES 45
7.3- COMPARAÇÃO DOS TRÊS PROCEDIMENTOS UTILIZADOS 46
7.4- TRABALHOS FUTUROS 47
ANEXO I 48
ANEXO II 60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71
SIMBOLOGIA 73

I- INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido com base em testes realizados em truques ferroviários, a fim de homologá-los para a utilização na Estrada de Ferro Carajas, segundo solicitação da Companhia Vale do Rio Doce.

Tais testes constaram de análise e qualificação dos truques quanto ao comportamento dinâmico dos mesmos na via, objeto de Tese de Doutoramento do Dr. Engº ANTONIO ARLINDO GUIDETTI PORTO , ensaios estáticos em sua estrutura para a determinação dos níveis de tensões na mesma e ensaios de resistência à fadiga.

O motivo da escolha do Centro de Tecnologia da UNICAMP pela Companhia Vale do Rio Doce, para que o mesmo realizasse tais testes através da Divisão de Engenharia Ferroviária, é que esta possui uma equipe altamente especializada em testes, desenvolvimentos tecnológicos, pesquisas, além de equipamentos bastante sofisticados para tal. Aliado a tudo isso, existe desde 1978 um convênio entre este Centro e a República Federal da Alemanha na área ferroviária, visando a absorção da alta tecnologia característica daquele país, através de estágio do pessoal da Divisão de Engenharia Ferroviária na Alemanha, além de permanente contato com especialistas alemães tanto em cursos, como também em trabalhos desenvolvidos em conjunto.

Assim sendo, o responsável pelo Laboratório de Ensaios de Componentes da Divisão de Engenharia Ferroviária, autor desta tese, ficou com o encargo de realizar os testes referentes a determinação dos níveis de tensões sob cargas estáticas nas laterais dos truques, objeto deste trabalho, e dos ensaios de resistência à fadiga dos mesmos.

Com este fim, foi adotada uma metodologia para a determinação de tais níveis de tensões constando de um estudo teórico através da teoria dos elementos finitos, chamado de primeiro procedimento, para uma pré-determinação dos mesmos, ensaios em campo para comparação dos resultados, chamado de segundo procedimento, e simulação do carregamento da lateral em laboratório para a determinação dos níveis de tensões, chamado de terceiro procedimento.

O procedimento teórico foi realizado através de um programa computacional bastante eficaz para este fim e constou de duas etapas, uma realizada no Centro de Tecnologia e outra na Germanischer LLoyd, localizada na cidade de Hamburgo, dentro do contexto do convênio ferroviário acima mencionado.

A adoção deste procedimento teve como objetivo principal uma pré-determinação dos níveis de tensões na estrutura.

O segundo e o terceiro prodecimentos adotados foram experimentais, onde foi utilizada a técnica da extensometria. Através deles, foram realizadas duas determinações dos níveis de tensões na lateral do truque. A primeira foi realizada com o truque em operação durante testes em campo, visando a obtenção das tensões nas laterais montadas no truque. A segunda foi realizada em laboratório, com a simulação do carregamento da estrutura numa condição bastante próxima da realidade e com a aplicação de um número de extensômetros bem maior que na primeira.

A partir disso, os resultados foram analisados, propiciando o estabelecimento de uma comparação dos três procedimentos adotados, complementarmente a determinação dos níveis de tensões na lateral.

Vale salientar que na ocasião da solicitação do trabalho pela Companhia Vale do Rio Doce, a Estrada de Ferro Carajas ainda encontrava-se em fase de construção. Isto acarretou no desenvolvimento de estudos para a escolha de trechos de via da Rede Ferroviária Federal S/A semelhantes ao traçado da Estrada de Ferro Carajas, a fim de ser possível a realização dos testes de campo, como mencionado acima.

A redação deste trabalho apresenta-se da forma mais didática possível, a fim de facilitar o acesso ao mesmo daqueles que se interessarem por ele.

É bom lembrar ainda que não foram desenvolvidos programas computacionais para o cálculo através da teoria dos elementos finitos , pois foi utilizado o SAP IV (Structural Analysis Program nº 4) , o qual necessita apenas do modelo estrutural, dos dados da malha de nós construída, das condições de contorno e das considerações desejadas.

Também não foi desenvolvida nem demonstrada a metodologia de cálculo de tensões através da extensometria, uma vez que foi considerada como básica para o nível deste trabalho mas que pode ser encontrada facilmente em várias bibliografias disponíveis atualmente, além de cursos de extensão, aperfeiçoamento, especialização e pós-graduação.

Os capítulos aqui apresentados constam do seguinte:

CAPÍTULO II- Determinação das propriedades mecânicas do material da lateral, através de ensaios mecânicos realizados em corpos de prova extraídos da estrutura da mesma

CAPÍTULO III- Determinação dos pontos críticos da estrutura através de uma pré-determinação dos níveis de tensões na lateral, através da teoria dos elementos finitos, com a elaboração de um modelo estrutural, confecção da malha de nós, condições de carregamento e execução do cálculo pelo SAP IV

CAPÍTULO IV- Determinação dos níveis de tensões nas laterais do truque durante os testes em campo, constando da escolha dos trechos para as viagens de medição, instrumentação das laterais, descrição do teste e resultados obtidos

CAPÍTULO V- Determinação dos níveis de tensões na lateral do truque, através do ensaio estático, constando da instrumentação da lateral, determinação das condições de carregamento, montagem no banco de ensaio, descrição do teste e resultados obtidos

CAPÍTULO VI- Análise dos resultados através das considerações a respeito das intensidades das tensões, distribuição das mesmas e comparação dos três procedimentos adotados

CAPÍTULO VII- Conclusões tiradas a respeito dos níveis de tensões, na comparação dos três procedimentos adotados e considerações concernentes a trabalhos futuros, tomando-se por base o presente

II- DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

A determinação das propriedades mecânicas do material da lateral do truque tem muita importância para a obtenção de parâmetros, que possibilitem a comparação dos níveis de tensões obtidos nos testes com as tensões limite do material. [13]

Para tanto, foram realizados ensaios mecânicos segundo a Norma ABNT NBR 6152/80, em corpos de prova extraídos de uma lateral, a fim de ser levada em conta a segurança, haja visto que com a retirada dos corpos de prova diretamente da estrutura, são levados em conta o processo de fabricação, o controle de qualidade e os vazios de fundição, sendo este último um fator inerente a materiais fundidos de estruturas de grandes dimensões.

Desta forma, os resultados obtidos refletem uma condição bastante real das características mecânicas do material.

Os corpos de prova retirados foram em número de 4 (quatro) e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1 do Anexo I.

III- DETERMINAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS DA ESTRUTURA ATRAVÉS DA TEORIA DOS ELEMENTOS FINITOS

Tanto na determinação dos níveis de tensões da lateral obtidos durante as medições em campo (Capítulo IV),como nos ensaios de laboratório (Capítulo V), foram utilizados extensômetros elétricos para a determinação das tensões. A escolha dos pontos da estrutura a serem aplicados os extensômetros é de fundamental importância na relevância dos resultados obtidos nas medições das tensões. Assim sendo, é necessário que se tenha uma boa base para a escolha de tais pontos. [1 e 5]

No presente capítulo será desenvolvido um estudo teórico visando única e exclusivamente a determinação dos pontos mais críticos da estrutura em termos de tensões, ou seja, a escolha dos pontos a serem aplicados os extensômetros. O método escolhido foi a teoria dos elementos finitos que além de determinar os pontos críticos da estrutura, também fornece os valores das tensões na mesma, proporcionando uma comparação dos mesmos com os valores das tensões obtidos nas viagens de medições e nos ensaios de laboratório. [6]

Assim sendo, com o intuito de enriquecer o presente trabalho, foram efetuadas as comparações dos valores das tensões acima citados o que propiciou uma avaliação dos dois métodos utilizados, ou seja, a teoria dos elementos finitos e a técnica da extensometria.

3.1- DESCRIÇÃO SUCINTA DO MÉTODO UTILIZADO

Existem vários métodos de estudo através da teoria dos elementos finitos. Neste trabalho, não foi desenvolvido nenhum estudo sobre a teoria nem elaborado um programa computacional para o cálculo das tensões, pois não se trata do objetivo do trabalho conforme já descrito anteriormente.

Neste sentido, foi adotado o programa computacional SAP IV (Structural Analysis Program IV), o qual é muito eficaz para a análise de estruturas pelo método dos elementos finitos. Para a sua execução deve ser feito o modelo da estrutura, a especificação do estado de tensões desejado, a construção da malha de nós dos

elementos, a especificação das coordenadas dos nós dos elementos , as condições de contorno (pontos de fixação, condições de carregamento, graus de liberdade, etc), a escolha do sistema de referên - cia e a especificação das grandezas desejadas. De posse destes dados o programa é processado e os resultados são fornecidos em forma de listagens e ploters. [14]

3.2- DETERMINAÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

A determinação do nível de tensões na lateral foi feita através de um estudo bidimensional do estado de tensões na estrutura.

A lateral do truque pode ser considerada simétrica segundo dois planos, um longitudinal e um transversal, ambos segundo a direção vertical. Desta forma, a estrutura fica dividida em quatro regiões simétricas geométricamente e denominadas por região 1, região 2, região 3 e região 4 como pode ser observado nas figuras 1 e 2.

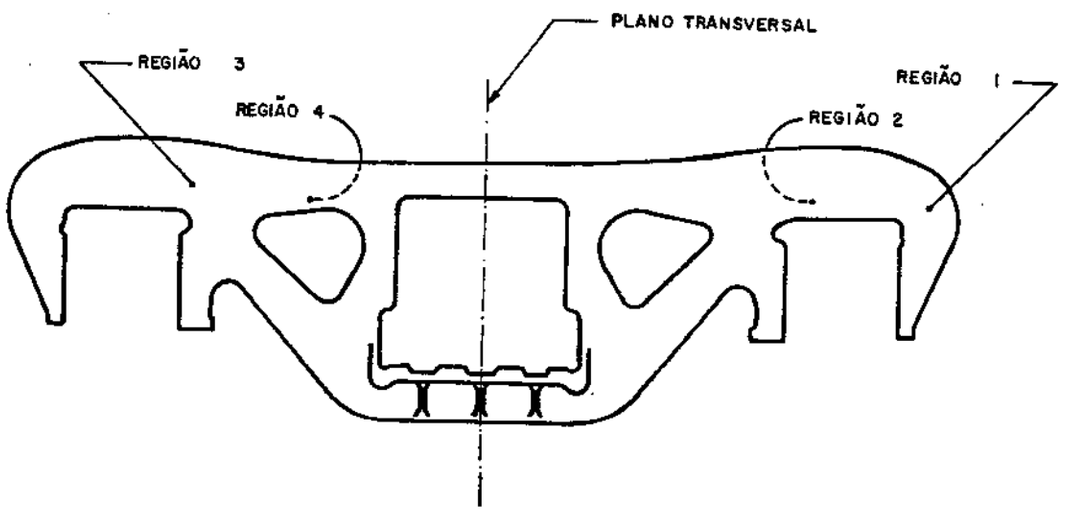


FIGURA 1 - Vista transversal da divisão da lateral em quatro regiões simétricas

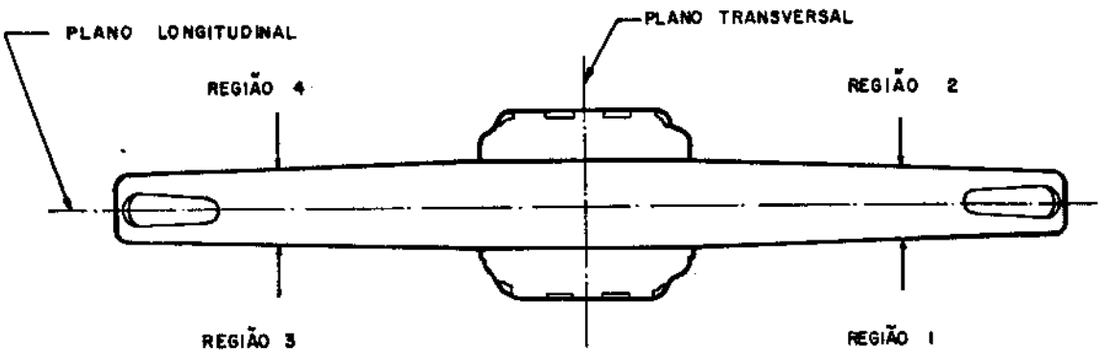


FIGURA 2 - Vista superior da divisão da lateral em quatro regiões simétricas

Para efeito de estudo, foi tomada apenas a região 1 da lateral, uma vez que a simetria da estrutura garante os mesmos resultados para as demais regiões.

O modelo estrutural para estudo através da teoria dos elementos finitos foi definido então, como mostra a figura 3.

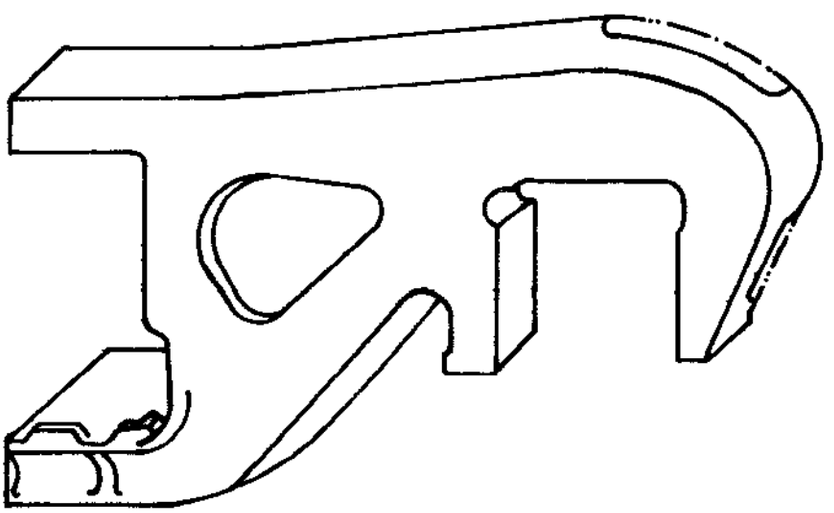


FIGURA 3 - Modelo estrutural adotado para o estudo através da teoria dos elementos finitos

3.3- CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO E DE FIXAÇÃO DO MODELO

Antes de se construir a malha dos elementos finitos é necessário se saber as condições de carregamento e de fixação do modelo. Para tanto, foi realizado um estudo das condições de carregamento reais a que a lateral é submetida em condições de trabalho . Tal estudo serviu tanto para orientar a construção da malha dos elementos finitos, como também para definir as condições do ensaio estático da estrutura (dispositivos, pontos de aplicação das cargas, etc), objeto do Capítulo V, além de permitir uma previsão dos pontos mais solicitados da mesma.[1, 6, 7, 8, 9, 10 e 14]

A lateral em estudo é componente de um truque formado basicamente por três estruturas independentes, uma viga e duas laterais. A interligação destas três peças é feita através de um sistema de suspensão constituído de molas e cunhas de fricção , de forma que a viga fica apoiada nas laterais através dele. Desta forma, existe uma liberdade de movimento das laterais em relação a viga do truque, o que faz com que as forças laterais e longitudinais tenham pouca influência sobre cada lateral, em relação as forças verticais. Disso resulta que o principal carregamento sofrido pela mesma, consiste das forças verticais devido ao peso próprio dos vagões. A reação destas forças é feita através dos mancais do rodeiro, resultando numa condição de carregamento conforme mostrado na figura 4.

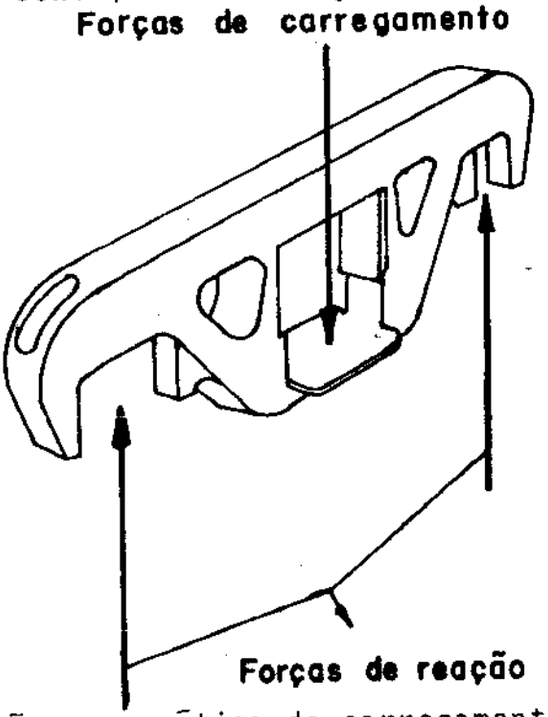


FIGURA 4 - Representação esquemática do carregamento da lateral

Com base no exposto acima foram definidas as condições de carregamento e de fixação do modelo estrutural de acordo com o esquema mostrado na figura 5.

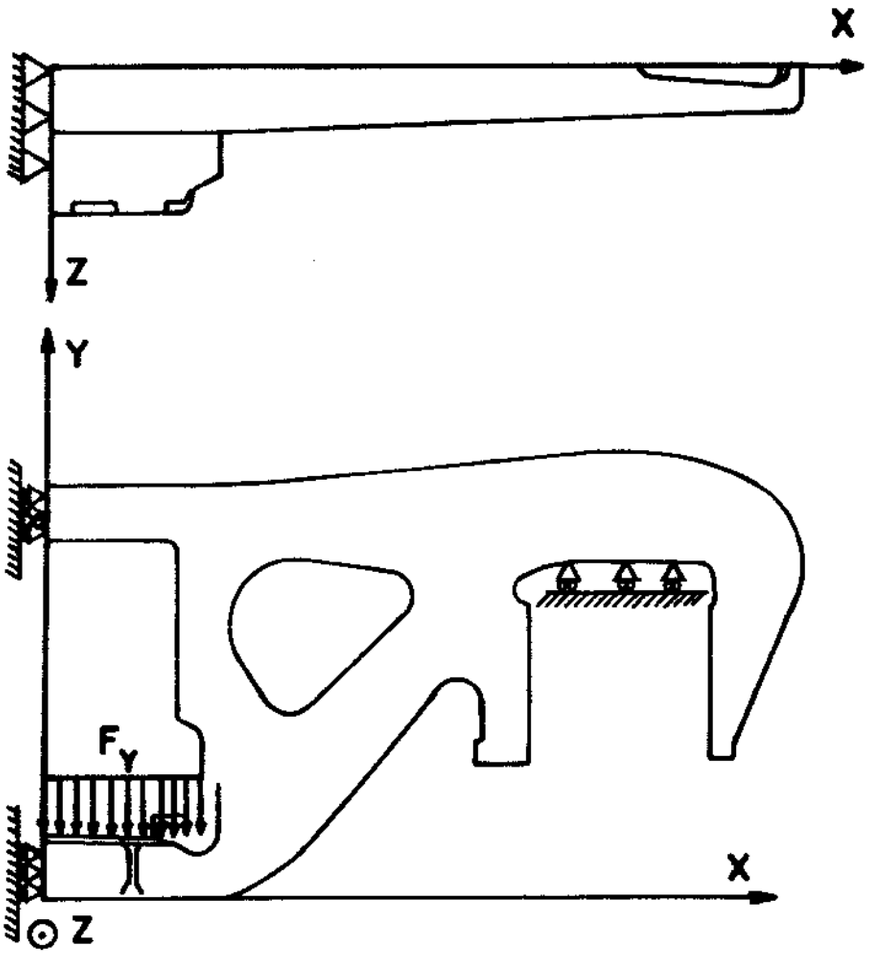


FIGURA 5 - Condições de carregamento e de fixação do modelo estrutural

O truque acima citado se destina a Estrada de Ferro Carajas, cuja carga por eixo é de 30 toneladas. Assim sendo, a força estática vertical de carregamento a que cada lateral fica submetida é de 300,0 kN aplicada na região dos assentos das molas de suspensão da viga, restando uma força de 150,0 kN para cada força de reação (adotou-se 1,0 kgf = 10,0 N).

O valor adotado para a força de carregamento F_y atuante no modelo foi de 75,0 kN, o que equivale proporcionalmente a uma carga estática de 300,0 kN na base da lateral do truque nas condições de operação normal do mesmo.

3.4- CONSTRUÇÃO DA MALHA DE NÓS DOS ELEMENTOS FINITOS

Como o estudo das tensões foi feito nos estados simples e duplo , a fim de ser gerada a malha de nós, foi atribuído ao modelo estrutural um sistema de coordenadas cartesianas bidimensional XY como mostra a figura 6.

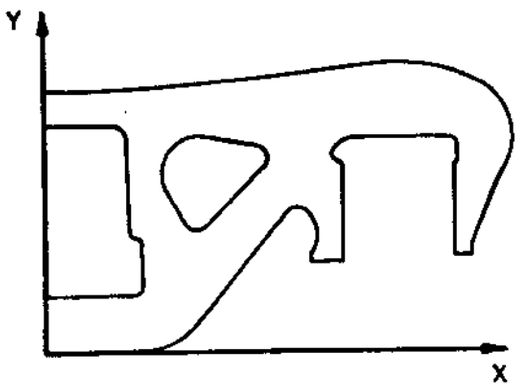


FIGURA 6 - Modelo estrutural dotado do sistema de coordenadas cartesianas para a geração da malha de nós

As dimensões do modelo correspondentes as profundidades do mesmo (vide eixo Z da figura 3) foram consideradas em cada um dos elementos da malha sob a forma de espessura dos mesmos.

Na construção da malha foram utilizados dois tipos distintos de elementos, os de viga e os de chapa.

Os elementos de viga são definidos por barras lineares com largura unitária, apresentando apenas dois nós (i e j) . Os elementos de chapa são definidos por quadriláteros ou triângulos , apresentando respectivamente quatro nós (i, j, k e ℓ) e três nós (i, j e k , com $k \equiv \ell$).

A figura 7 mostra as formas dos elementos acima descritos.

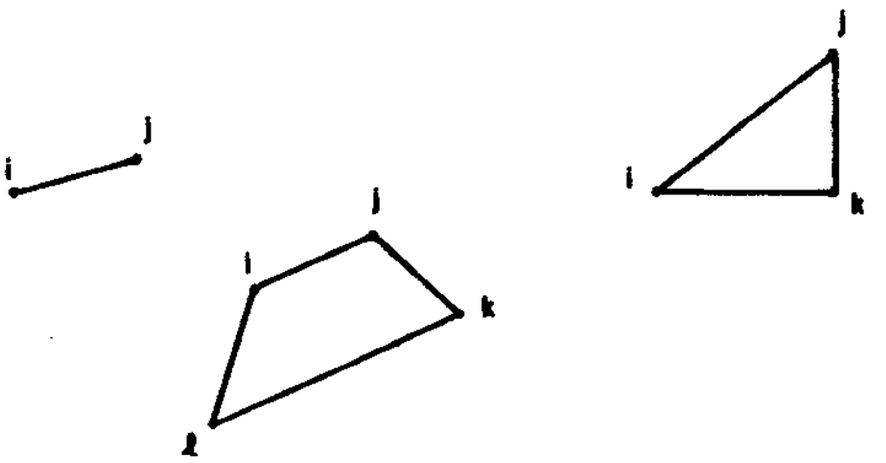


FIGURA 7 - Tipos de elementos utilizados na construção da malha

A distribuição dos elementos foi feita distintamente em dois tipos de regiões; as regiões definidas pelas superfícies de contorno do modelo e furos e as regiões delineadas pelas superfícies de contorno como mostra a figura 8.

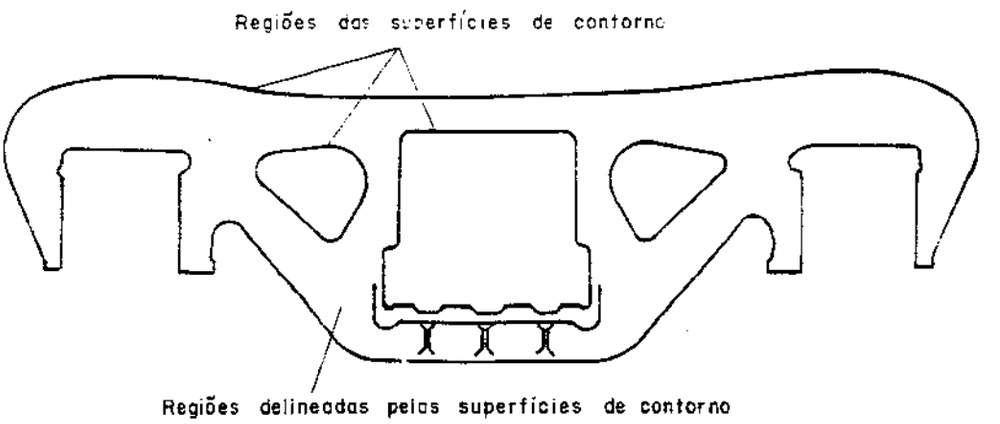


FIGURA 8 - Regiões definidas pelas superfícies de contorno do modelo e dos furos do mesmo e regiões delineadas por estas superfícies

Nas superfícies de contorno do modelo e dos furos do mesmo foram utilizados os elementos de viga. A razão desta distribuição foi a determinação das tensões nas regiões da estrutura que apresentam as maiores profundidades e os elementos de viga são os mais indicados nestes casos. As tensões fornecidas por eles são as máximas tensões de cada um,tomadas na direção do comprimento de cada elemento, ou seja, tensões axiais (estado simples de tensão), pois o elemento é uma viga .

Na construção desta malha foram utilizados 155 elementos e consequentemente 155 nós conforme mostra o desenho 1 do Anexo II.

Nas superfícies internas aos contornos do modelo e dos furos do mesmo, os quais já contêm os elementos de viga, foram utilizados os elementos de chapa. Nesta distribuição foram utilizados uma grande maioria de elementos em forma de quadriláteros e uma minoria em forma de triângulos. A razão disso é que os elementos em forma de quadriláteros são mais elásticos que os elementos em forma de triângulos, e neste caso, como as superfícies da estrutura são grandes e as suas espessuras são pequenas, implicando em uma estrutura elástica, é prudente que se utilize a disposição acima citada, a fim de se obter bons resultados (são fornecidas tensões no estado duplo).

Na construção desta malha foram utilizadas 383 elementos perfazendo um total de 457 nós , conforme mostra o desenho 2 do Anexo II.

3.5- REALIZAÇÃO DO CÁLCULO COMPUTACIONAL E RESULTADOS OBTIDOS

Após definida a malha de nós dos elementos procedeu - se ao cálculo das tensões através do programa computacional SAP IV , conforme descrito anteriormente. Para tanto, foram perfurados os devidos cartões com os dados requeridos pelo programa e a seguir o mesmo foi processado num computador Olivetti da Germanischer LLoyd sob a orientação do Dr. Ing. Ernst Detlev Egge na cidade de Hamburgo na República Federal da Alemanha. Assim sendo, foram obtidos os vários níveis de tensões para o modelo estrutural conforme descrito anteriormente. [14]

Os resultados dos valores e das direções das tensões es-

tão apresentados em dois grupos distintos, tais sejam, as tensões fornecidas pelos elementos de viga e as tensões fornecidas pelos elementos de chapa. Nos dois grupos os resultados foram fornecidos através de tabelas e de gráficos que contêm a distribuição, a orientação e os valores das tensões tomadas nos centróides de cada um dos elementos da malha.

Os resultados obtidos para as tensões nos elementos de viga constam em sua totalidade do desenho 3 do Anexo II. Na Tabela 2 do Anexo I estão apresentados os valores mais significativos das tensões no estado simples.

Os resultados obtidos para as tensões nos elementos de chapa constam em sua totalidade do desenho 4 do Anexo II. Na Tabela 3 do Anexo I estão apresentados os valores mais significativos das tensões no estado duplo.

Quanto a apresentação dos resultados cabem as seguintes observações:

1- Tabela 2 do Anexo I (elementos de viga)

Nesta tabela estão apresentados os valores máximos das tensões axiais σ ocorridos no centro de cada elemento e com direção coincidente com o seu eixo longitudinal. Os sinais positivos (+) e negativos (-) presentes nos valores da tabela indicam respectivamente tensões de tração e compressão no elemento.

2- Desenho 3 do Anexo II (elementos de viga)

Neste desenho aparece a distribuição das tensões axiais em todos os elementos de viga do modelo, tanto qualitativa como quantitativamente. Nele são observados segmentos de reta perpendiculares e centrais a cada elemento. Os segmentos de reta com extremidades em forma de seta indicam tensões de tração enquanto que os segmentos de reta com traços ortogonais em suas extremidades indicam tensões de compressão. As amplitudes das tensões são proporcionais a tais segmentos de reta e a quantificação das mesmas é feita através da escala apresentada no desenho. A figura 9 ilustra o descrito acima.

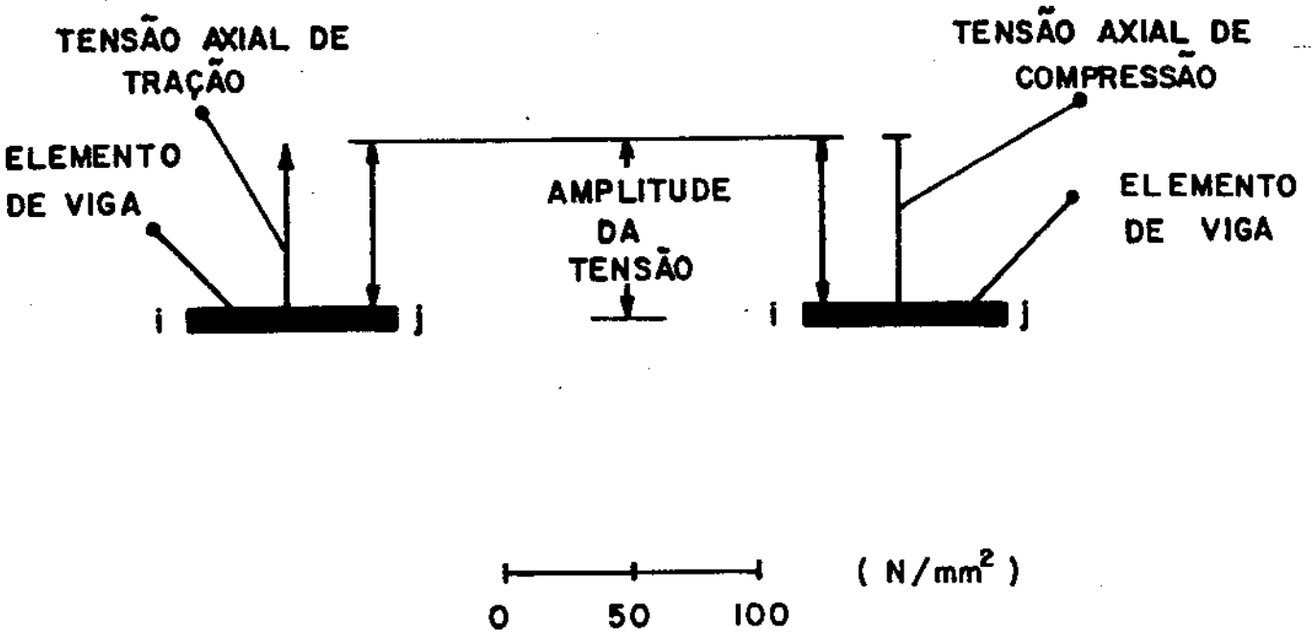


FIGURA 9 - Ilustração da determinação gráfica das tensões nos elementos de viga

3- Tabela 3 do Anexo I (elementos de chapa)

Nesta tabela estão apresentados os valores das tensões principais σ_1 e σ_2 bem como os valores dos ângulos α que determinam as direções das tensões principais de maior valor absoluto (σ_1). As direções das tensões principais de menor valor absoluto (σ_2) ficam determinadas consequentemente a 90^0 das direções de σ_1 . O ângulo α é definido como o ângulo formado entre as direções da tensão principal σ_1 e do eixo coordenado X, medido no sentido anti-horário e a partir do referido eixo. Os sinais positivos (+) e negativos (-) presentes nos valores da tabela indicam respectivamente tensões de tração e compressão no elemento. A figura 10 ilustra a determinação das direções das tensões.

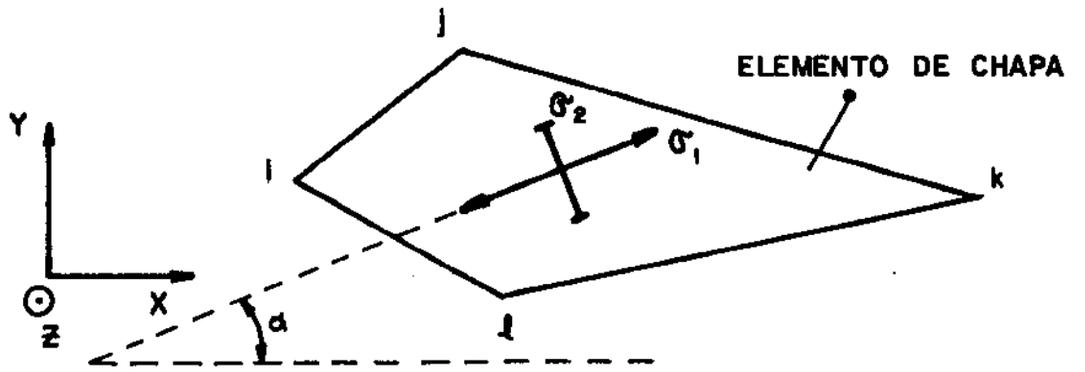


FIGURA 10- Ilustração da determinação das direções das tensões σ_1 e σ_2 através do ângulo α da Tabela 3 do Anexo I

4- Desenho 4 do Anexo II (elementos de chapa)

Neste desenho aparece a distribuição das tensões no estado duplo em cada um dos elementos de chapa do modelo , tanto qualitativa como quantitativamente. Cada elemento da malha apresenta no seu centro, a representação gráfica das duas tensões principais σ_1 e σ_2 através de segmentos de reta perpendiculares, caso existam as duas. A convenção para definir o tipo de tensão é análoga a dos elementos de viga , ou seja, setas nas duas extremidades de um dos segmentos de reta significa tensão de tração, enquanto que traços ortogonais nas duas extremidades do outro segmento de reta significa tensão de compressão. Aqui, as direções das tensões são as mesmas mostradas graficamente. As amplitudes das tensões são,como no caso dos elementos de viga, proporcionais aos comprimentos dos segmentos de reta. Assim sendo, a quantificação das mesmas é feita através da escala apresentada no desenho. A figura 11 ilustra o descrito acima.

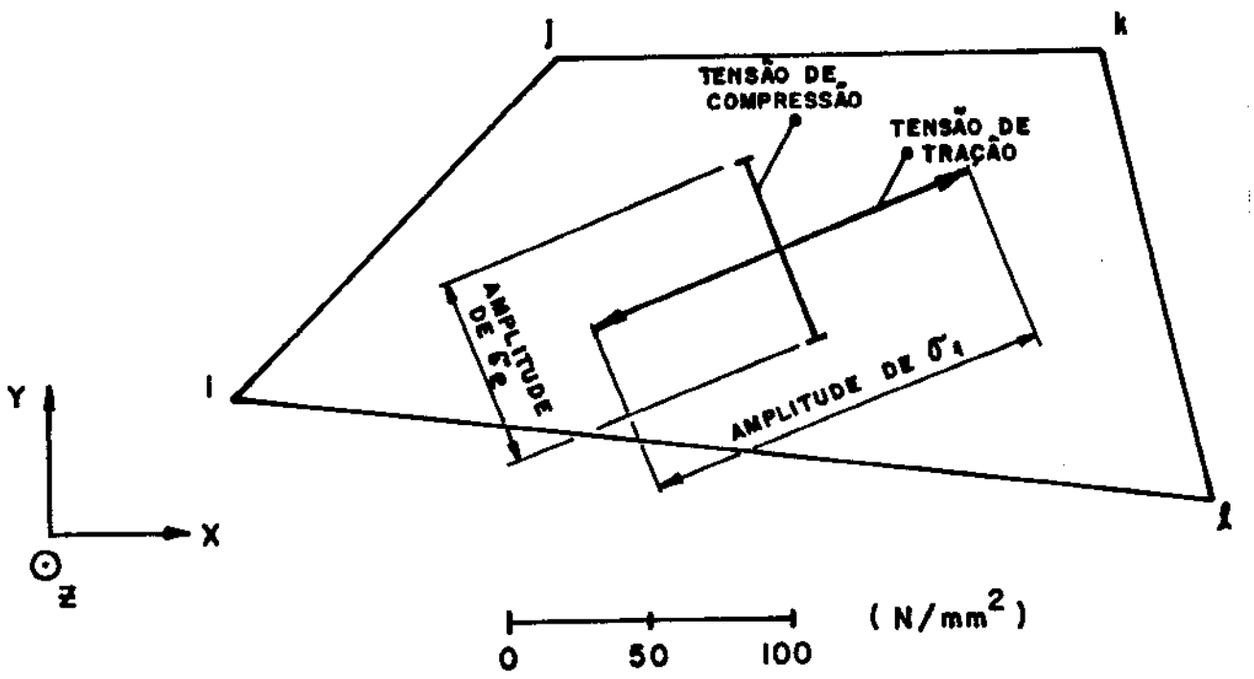


FIGURA 11 - Ilustração da determinação gráfica das tensões nos elementos de chapa

De posse destes resultados, procedeu-se a análise dos mesmos e a escolha dos pontos a serem aplicados os extensômetros elétricos para a determinação dos níveis de tensões na lateral , tanto nos testes em campo, como no ensaio estático, objeto dos Capítulos IV e V respectivamente.

IV- DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES NAS LATERAIS DO TRUQUE DURANTE TESTES EM CAMPO

4.1- DESCRIÇÃO SUCINTA DA METODOLOGIA UTILIZADA

Durante os testes para avaliação de truques ferroviários a serem utilizados pela Companhia Vale do Rio Doce na Estrada de Ferro Carajas, objeto da Tese de Doutoramento do Dr. Engº Antonio Arlindo Guidetti Porto, sob o título "Contribuição Ao Procedimento De Avaliação De Truques Ferroviários Através Do Comportamento Dinâmico Na Via", foram determinados os níveis de tensões em vários pontos das duas laterais de um truque instrumentado utilizado nas viagens para as várias medições realizadas em campo. [11]

Para a realização das viagens de medições com o truque instrumentado, o mesmo foi equipado com transdutores de deslocamento, transdutores de aceleração, um rodeiro instrumentado para a medição das forças de contato roda/trilho nas direções vertical, lateral e longitudinal, além da aplicação de extensômetros elétricos em vários pontos de sua estrutura. [2]

O objetivo principal destas medições foi a avaliação do truque através do seu comportamento dinâmico na via.

No presente trabalho, serão considerados apenas os níveis de tensões nas laterais do truque instrumentado, medidos através de extensômetros elétricos aplicados nas mesmas.

4.2- ESCOLHA DOS TRECHOS DE VIA PARA A REALIZAÇÃO DAS VIAGENS

Na ocasião da realização dos testes em campo, a Estrada de Ferro Carajas ainda se encontrava em fase de construção, sendo desta forma impossível a realização das viagens de medições para a coleta de dados necessários. Assim sendo, foram realizados estudos das características de vários trechos de via já existentes , tendo por objetivo a determinação da que mais se assemelhasse geométricamente ao da Estrada de Ferro Carajas. Para tanto, foram considerados diversos parâmetros de comparação tais como: comprimento da via, comprimento das curvas, raios mínimos, médios e máximos

das curvas, número de desvios, carga por eixo, etc. Como resultado disso, foram escolhidos trechos de vias da RFFSA nas regiões de Três Rios, entre os km 172 e 183 e Barra do Piraí, entre os km 110 e 117.

Dos trechos acima citados, não foram consideradas as medições em 7,2 km de via, devido a mesma não apresentar as características exigidas.

No quadro abaixo encontra-se a comparação dos diversos parâmetros acima citados, apresentados pela Estrada de Ferro Carajás e os trechos escolhidos para as medições.

Comparação entre os diversos parâmetros de via apresentados pela EFC e os trechos escolhidos (Três Rios/Barra do Piraí)

PARÂMETRO UTILIZADO	ESTRADA DE FERRO CARAJAS	TRECHOS DE TRÊS RIOS E BARRA DO PIRAÍ
Comprimento da via	890 km	10,8 km
Comprimento médio das curvas	700 m	152 m
Raio mínimo das curvas	860 m	818 m
Raio médio das curvas	1.500 m	887 m
Número de curvas/km	0,4	1,1
Número de pontes/km	0,07	0,55
Número de desvios/km	0,12	0,55
Relação comprimento curvas/via	0,27	0,17
Trilho Utilizado	TR-68	TR-68
Inclinação do trilho	1:40	1:40
Carga por eixo	30 ton	30 ton

Ficou desta forma, definido o percurso de via a ser utilizado para as realizações das medições em campo. [11]

4.3- ESCOLHA DOS PONTOS PARA A APLICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS E DISTRIBUIÇÃO DOS MESMOS NAS LATERAIS DO TRUQUE

Tomando-se como base a determinação dos pontos críticos da estrutura através da teoria dos elementos finitos (Capítulo III), foram escolhidos 20 pontos na lateral 1 e 10 pontos na lateral 2, a fim de serem aplicados os extensômetros elétricos.

Na escolha dos pontos a serem aplicados os extensômetros como descrito acima, cada extensômetro foi posicionado de forma a ter um elemento finito correspondente, ou seja, ambos com as mes - mas cotas na estrutura.

Para efeito de identificação dos extensômetros,as laterais foram chamadas de lateral 1 e lateral 2. Após a determinação dos pontos foi feita a escolha e a aplicação dos respectivos extensômetros nas duas laterais. Na lateral 1 foram aplicados 12 extensômetros do tipo linear e 8 do tipo roseta,enquanto que na lateral 2 foram aplicados 2 extensômetros do tipo linear e 8 do tipo roseta. Os extensômetros utilizados foram da marca Hottinger com 120 Ω de resistência, sendo do modelo LY 11 para os lineares e RY 11 para as rosetas. As localizações dos extensômetros, bem como a sua enumeração são mostradas nas figuras 12 e 13, respectivamente para as laterais 1 e 2. [4]

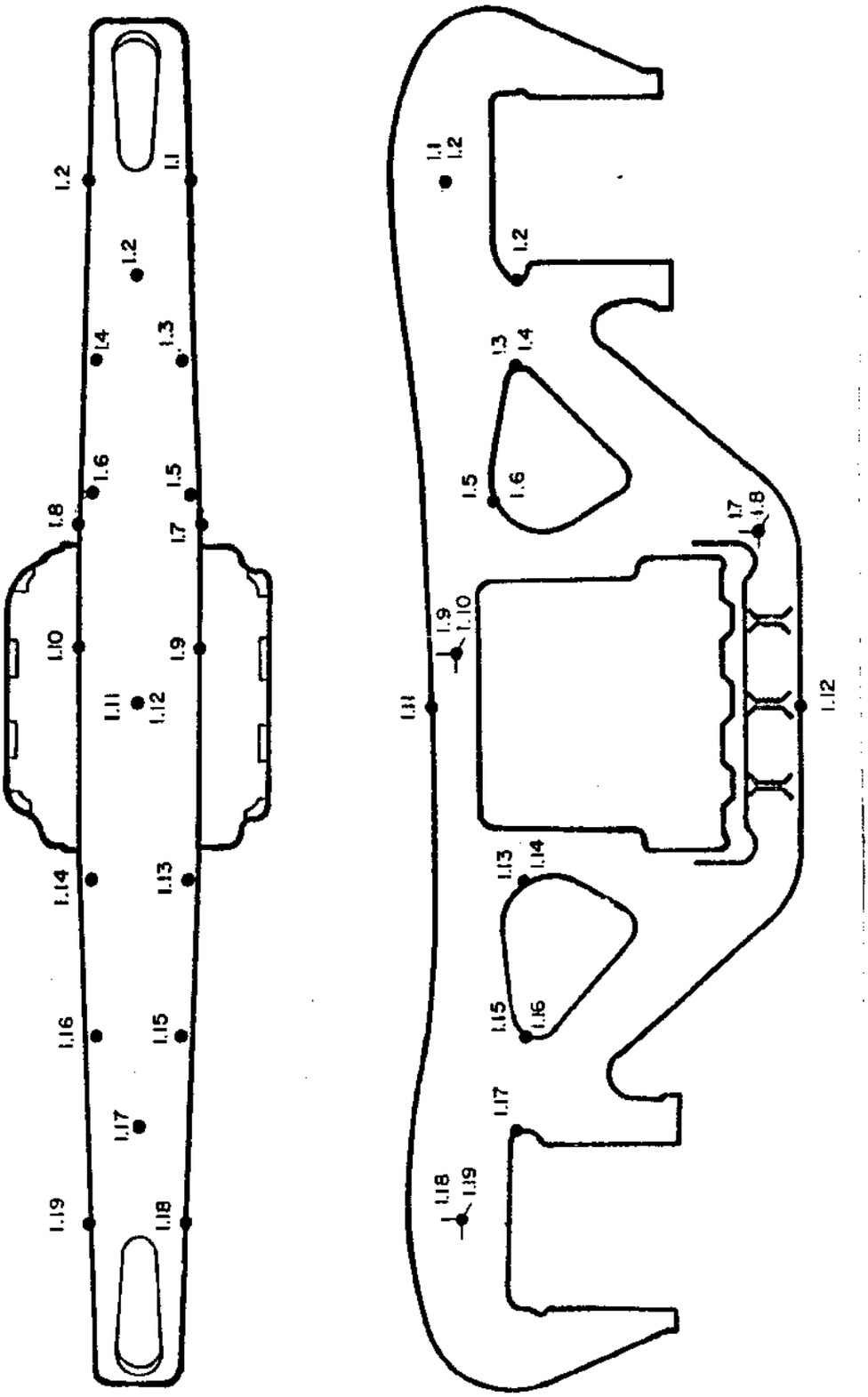


FIGURA 12 - Localização dos extensômetros na lateral 1 para a determinação dos níveis de tensões durante os testes de campo

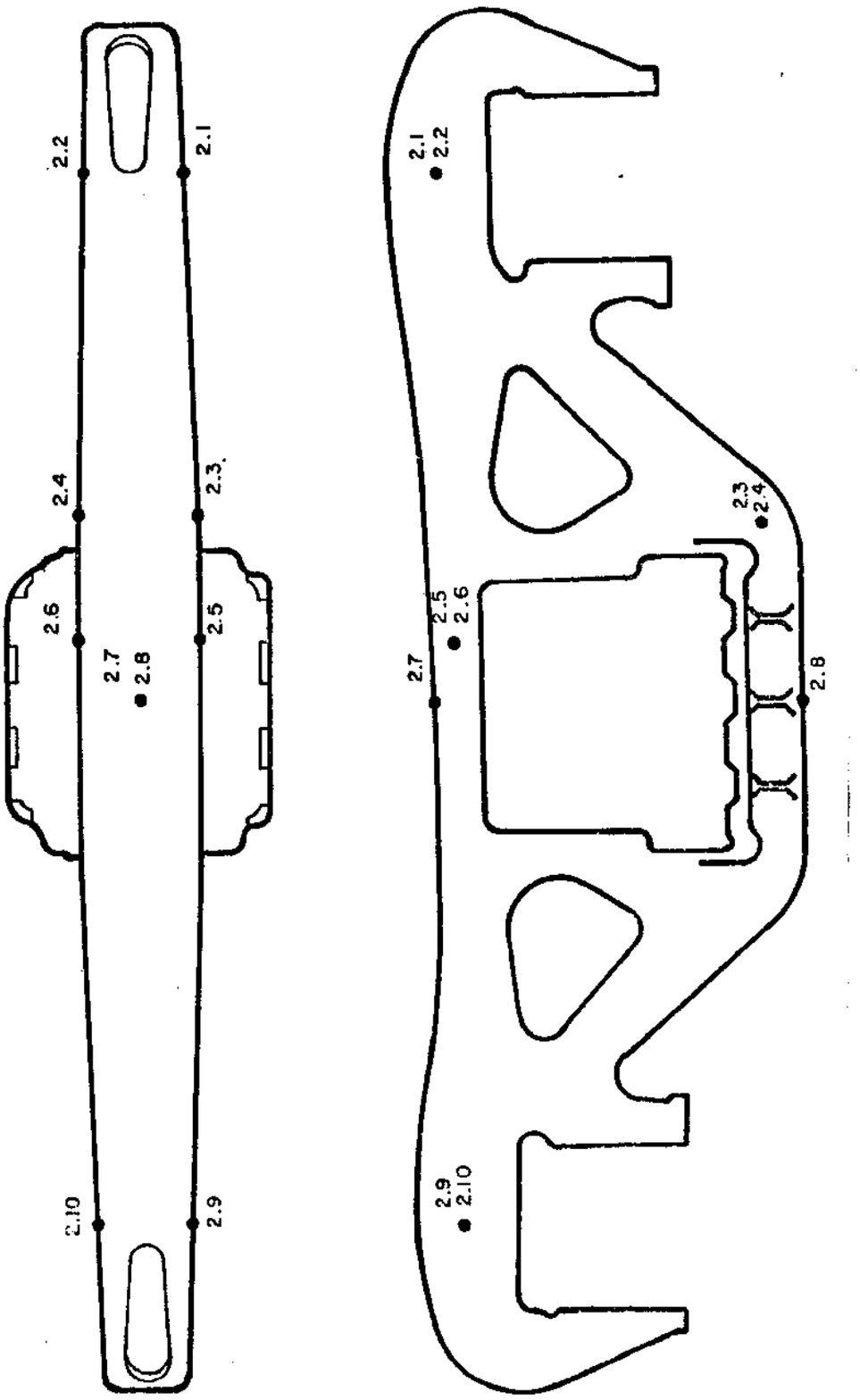


FIGURA 13 - Localização dos extensômetros na lateral 2 para a determinação dos níveis de tensões durante os testes de campo

Para cancelar o efeito da temperatura nas leituras dos extensômetros ativos, foram utilizados os extensômetros de compensação térmica ligados através de circuito de meia ponte. Estes extensômetros foram aplicados em uma placa do mesmo material da lateral e foi colocada juntamente com a estrutura, porém sem receber nenhum esforço mecânico.

Analogamente ao procedimento adotado no cálculo pela teoria dos elementos finitos, os extensômetros do tipo linear foram utilizados para a determinação das tensões axiais nas regiões definidas pelas superfícies de contorno das laterais , enquanto que os extensômetros do tipo roseta retangular foram utilizados para a determinação das possíveis tensões no estado duplo nas regiões delineadas pelas superfícies de contorno das laterais (vide figura 8 do item 3.4).

Este procedimento foi adotado visando obter distintamente as tensões nos estados simples e duplo, a fim de facilitar a comparação dos resultados obtidos com os fornecidos pela teoria dos elementos finitos.

4.4- REALIZAÇÃO DOS TESTES DE CAMPO E RESULTADOS OBTIDOS

A fim de submeter as laterais aos esforços devido ao tráfego, foi montada uma composição constando de uma locomotiva, um vagão auxiliar, um vagão de medições com todo equipamento necessário e dois vagões de minério, tendo sido instalado sob um deles , o truque instrumentado. A figura 14 mostra o esquema da composição enquanto que as fotos 1 e 2 ilustram a mesma, bem como seus detalhes. [11]

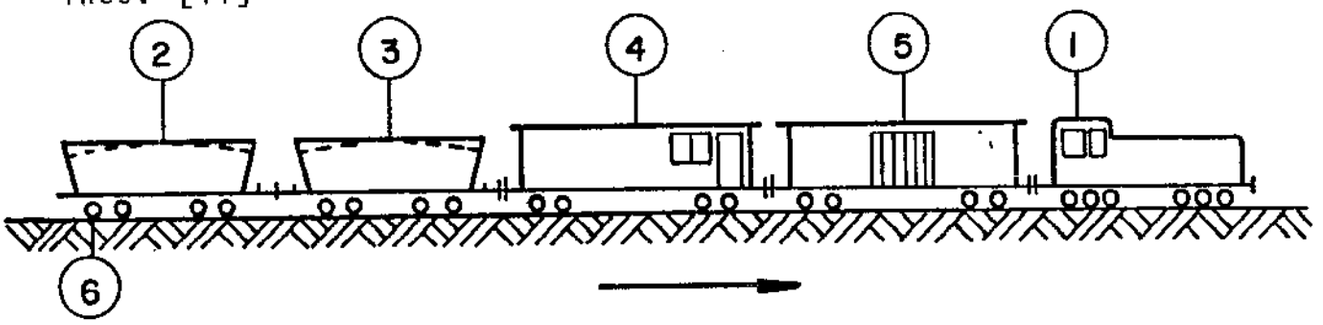


FIGURA 14 - Esquema da composição utilizada nas medições em campo 1) Locomotiva; 2 e 3) Vagões de minério acoplados; 4) Carro com equipamento de medição e serviços auxiliares 5) Vagão com equipamento auxiliar (grupo gerador, ferramentas e materiais diversos); 6) Truque instrumentado

FOTO 1 - Composição utilizada nos testes de campo

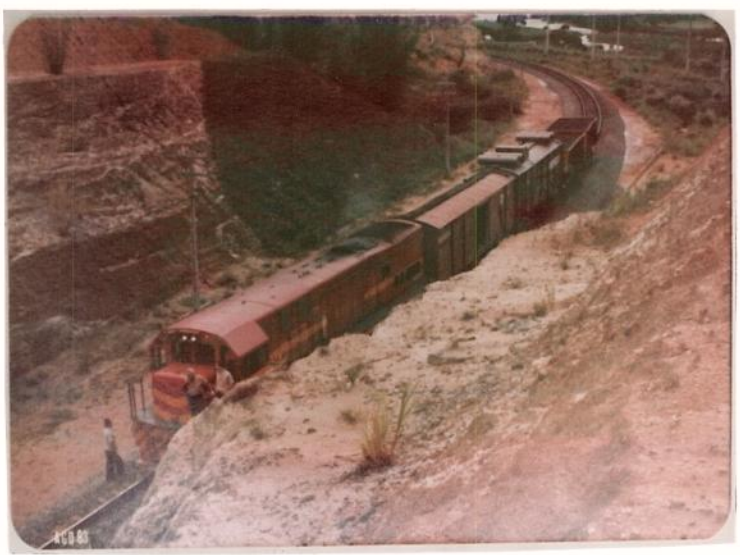


FOTO 2 - Composição durante a realização das via - gens de medição

A seguir foram realizadas várias viagens de medições nos trechos de via selecionados para tal, conforme descrito no item 4.2, ora com os vagões de minério vazios, ora carregados.

Para a avaliação das tensões nas laterais 1 e 2 , foram consideradas apenas as medições com os vagões de minério carrega - dos. A quantidade de minério utilizada foi dosada de forma que a carga por eixo fosse de 30,0 ton. Desta forma, a força estática aplicada em cada uma das laterais através da viga do truque foi de 300,0 kN. Esta condição de carregamento da lateral é a que foi utilizada na determinação dos níveis de tensões através da teoria dos elementos finitos (Vide figura 4 do Capítulo III).

Durante as viagens de medições nos testes de campo, foram registrados constantemente os valores de todas as grandezas acima mencionadas, através de gravadores de fita magnética e de registra dores de papel fotossensível, uma vez que tais grandezas variaram dinamicamente durante o percurso.

A foto 3 ilustra o carregamento dos vagões de minério pa- ra a realização dos testes de campo nos trechos de via de Três Rios e Barra do Piraí (vide item 4.2).

FOTO 3 - Vagão de minério sendo carregado para a

De posse dos registros, foi feita a análise dos resultados, levando-se em conta as grandezas e as condições desejadas.

Neste capítulo, como já descrito no seu início, só interessou os níveis de tensões apresentados pelas laterais do truque instrumentado. Assim sendo, foram selecionados os registros das viagens com os vagões de minério carregados, e através deles, determinados os valores das tensões fornecidos pelos extensômetros aplicados nas laterais. Os valores de tensões considerados foram os máximos valores apresentados por cada extensômetro para as cargas de 30,0 toneladas por eixo (condição de carregamento adotada neste trabalho).

Tendo em vista a simetria da peça conforme descrito anteriormente (vide figuras 1 e 2), muitos dos extensômetros foram aplicados também simetricamente, como mostram as figuras 12 e 13 . Tanto para efeito de visualização dos níveis de tensões, como para efeito de comparação dos resultados fornecidos pelas duas técnicas utilizadas, foi adotado um critério de apresentação dos resultados análogo ao da teoria dos elementos finitos, ou seja, o nível de tensões foi apresentado em um dos quatro quartos de lateral simétricos como mostra o desenho 5 do Anexo II, tendo sido determinados 8 pontos característicos a fim de representar a distribuição de tensões na estrutura, haja visto sua simetria. Os valores das tensões nos mesmos estão mostrados nos desenhos 6 e 7 do Anexo II, respectivamente para os extensômetros do tipo linear (superfícies de contorno) e para os extensômetros do tipo roseta (regiões internas às superfícies de contorno).

Nestes desenhos podem ser visualizados os níveis de tensões, bem como as direções e a identificação das mesmas (segmentos com setas nas extremidades significam tração, enquanto segmentos com traços ortogonais nas extremidades significam compressão) , além dos valores das amplitudes delas, medindo-se os comprimentos dos segmentos e comparando-os com as escalas dos desenhos.

Os valores das tensões também foram apresentados em forma de tabelas, analogamente aos resultados apresentados pela teoria dos elementos finitos. Este procedimento foi adotado,pois além de ser uma forma mais direta de se observar os resultados, também facilita a comparação dos mesmos com os determinados teoricamente e através do ensaio estático em laboratório (Capítulo V).

Para tanto, foram construídas duas tabelas, a Tabela 4 do Anexo I, que contêm os valores das tensões axiais σ fornecidos pelos extensômetros lineares e a Tabela 5 do Anexo I , que contêm os valores das tensões principais σ_1 e σ_2 e o ângulo α que define a direção de σ_1 , tensões estas fornecidas pelos extensômetros tipo roseta.

O ângulo α apresentado na Tabela 5 define a direção da tensão principal de maior valor absoluto (σ_1), medido a partir do eixo X e no sentido anti-horário, seguindo o mesmo critério utilizado para as tensões nos elementos finitos de chapa (vide observação 3 do item 3.5).

Da mesma forma convencionada na apresentação dos resultados na teoria dos elementos finitos, os sinais positivos (+) indicam tensões de tração, enquanto que os sinais negativos (-) indicam compressão.

Nas tabelas 4 e 5 ainda aparecem os números dos elementos finitos correspondentes aos pontos em que se situam os extensômetros, a fim de facilitar a comparação dos resultados.

V- DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES NA LATERAL DO TRUQUE ATRAVÉS DO ENSAIO ESTÁTICO

5.1- DESCRIÇÃO SUCINTA DO ENSAIO ESTÁTICO

O ensaio estático da lateral visou a determinação dos níveis de tensões na estrutura devido a um carregamento da mesma exatamente de acordo com as condições estabelecidas como básicas para o desenvolvimento deste trabalho (vide considerações feitas no item 3.3 e representação esquemática do carregamento da lateral na figura 4). Para tanto, foi projetado e construído um banco de ensaio através de dispositivos especiais e do sistema Hydropuls Schenck de aplicação de cargas. [3, 5 e 12]

Desta forma, a lateral foi apoiada sobre dois suportes situados nas regiões dos encaixes dos mancais dos rodeiros e carregada na base que suporta as molas de suspensão da viga do truque através de um dispositivo rígido diretamente ligado a um atuador hidráulico do sistema hydropuls.

A fim de serem determinados os níveis de tensões na lateral, foram aplicados vários extensômetros elétricos na mesma . Os pontos de aplicação dos extensômetros foram determinados tomando-se como base os níveis de tensões obtidos através da teoria dos elementos finitos, analogamente ao procedimento adotado na instrumentação das laterais do truque para a realização das viagens de medições, objeto do Capítulo IV.

Com a lateral sob carga, foram registrados os valores das deformações apresentadas pelos extensômetros e a partir delas calculadas as tensões respectivas, sendo então determinados os níveis de tensões na estrutura.

5.2- ESCOLHA DOS PONTOS PARA A APLICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS E DISTRIBUIÇÃO DOS MESMOS NA LATERAL

Tomando-se como base a determinação dos níveis de tensões na lateral, obtidos através da teoria dos elementos finitos (Capítulo III), foram escolhidos os pontos para a aplicação dos extensômetros na estrutura. Tais pontos foram cuidadosamente selecionados de forma a se obter os níveis de tensões,tanto nas regiões mais

críticas da estrutura, como também em certos pontos complementares a fim de se efetuar uma melhor comparação dos resultados obtidos no ensaio estático, com os resultados obtidos no cálculo teórico (Capítulo III) e nos testes em campo (Capítulo IV).

Desta forma, foram especificados 77 pontos para a aplicação dos extensômetros. Cada um destes pontos, tem um elemento finito correspondente no cálculo teórico, a fim de serem comparados os resultados. Nos 77 pontos da estrutura foram aplicados extensômetros da marca Hottinger com 120 Ω de resistência, sendo 19 lineares do tipo LY 11, 18 rosetas do tipo RY 11 e 4 correntes de 10 extensômetros cada uma do tipo KY 11. [4]

Feito isso, foi realizada a conexão da fiação elétrica aos extensômetros, fixação dos cabos na estrutura e posterior ligação aos instrumentos de medida.

A compensação de temperatura foi feita através de extensômetros aplicados em uma placa de mesmo material da lateral sem sofrer esforços mecânicos e ligados em forma de meia ponte com os extensômetros ativos.

Analogamente ao procedimento adotado no cálculo pela teoria dos elementos finitos (Capítulo III) e nos testes em campo (Capítulo IV), os extensômetros do tipo linear foram utilizados para a determinação das tensões axiais nas regiões definidas pelas superfícies de contorno da lateral , enquanto que os extensômetros tipo roseta retangular foram utilizados para a determinação das possíveis tensões no estado duplo nas regiões delineadas pelas superfícies de contorno da lateral (vide figura 8 do item 3.4).

Este procedimento visou obter distintamente as tensões nos estados simples e duplo, a fim de facilitar a comparação dos resultados obtidos através das três técnicas utilizadas na determinação dos níveis de tensões da lateral.

A figura 15 mostra a localização bem como a enumeração dos extensômetros na lateral.

As fotos 4 e 5 ilustram a preparação e a instrumentação da lateral para o teste estático.

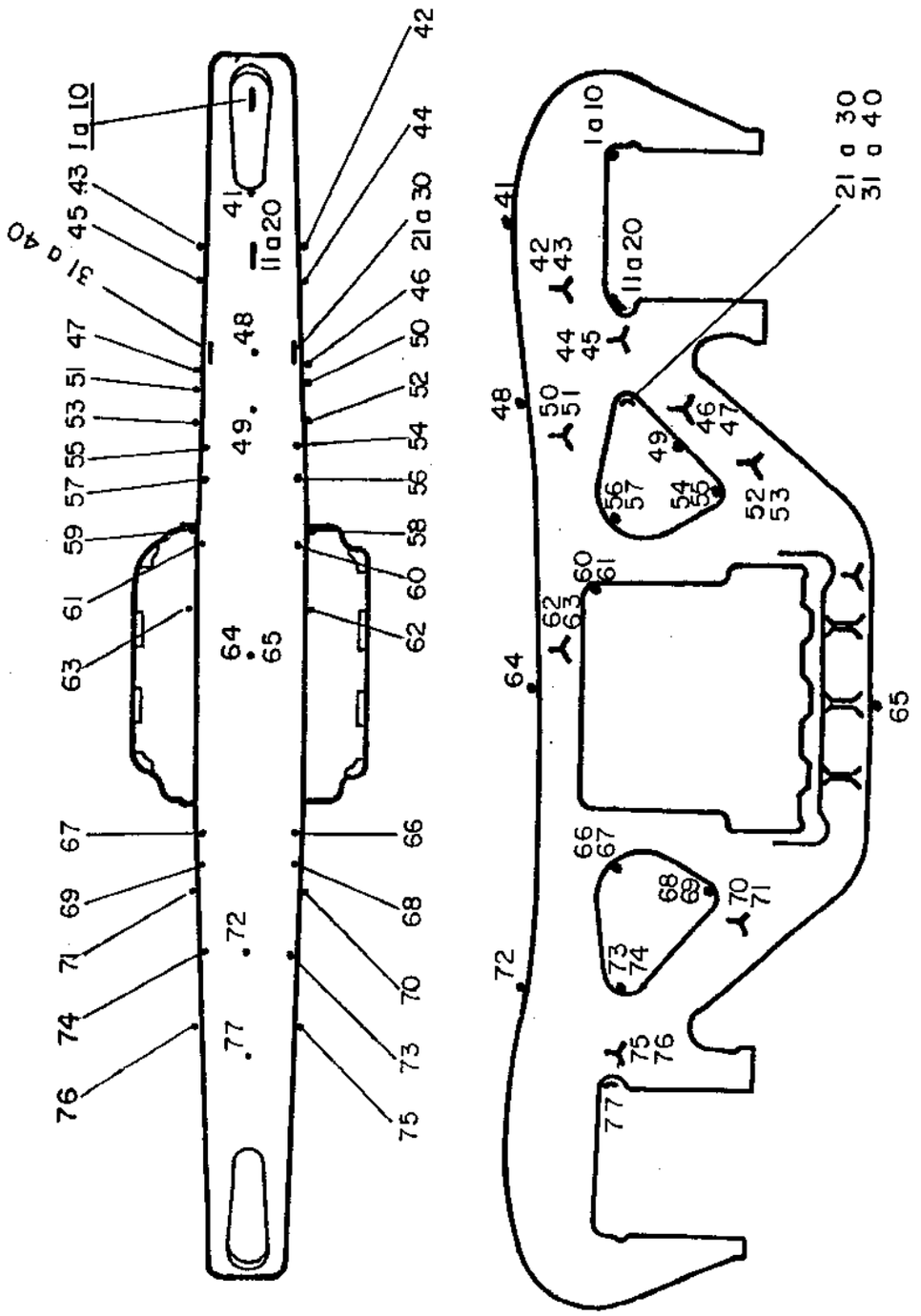


FIGURA 15 - Distribuição dos extensômetros na lateral utilizada no ensaio estático

FOTO 4 - Preparação da lateral e instrumentação da mesma através dos extensômetros

FOTO 5 - Ligação da fiação elétrica aos extensômetros e fixação dos cabos na lateral

5.3- MONTAGEM DA LATERAL NO BANCO DE ENSAIOS

Para a realização do teste estático foi montado um banco de ensaio capaz de reproduzir os efeitos dos carregamentos determinados nas considerações feitas no item 3.3 e representação esquemática mostrada na figura 4, conforme descrito no item 5.1. Para tal, foram projetados e construídos dispositivos especiais para aplicação e reação das cargas . Estas cargas foram aplicadas pelo sistema Hydropuls, através de um atuador hidráulico com capacidade de 400 kN. Na região de carregamento foram colocados cilindros de aço em substituição as molas de suspensão da viga a fim de se obter uma carga uniformemente distribuída. Nos locais de reação das forças, foram instalados dispositivos que representassem os efeitos dos mancais dos rodeiros. [3]

As figuras 16, 17 e 18 mostram os dispositivos utilizados na aplicação e reação das cargas.

A foto 6 ilustra a execução do teste estático no banco de ensaio utilizado.

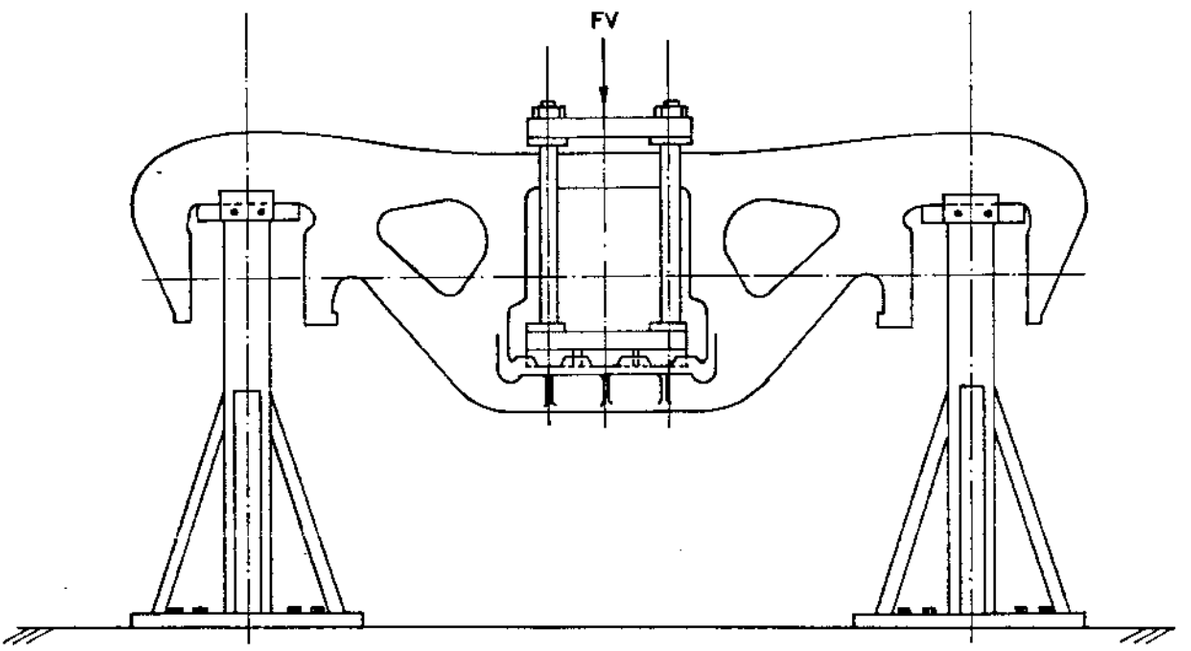


FIGURA 16 - Vista transversal dos dispositivos de aplicação e reação de cargas na lateral

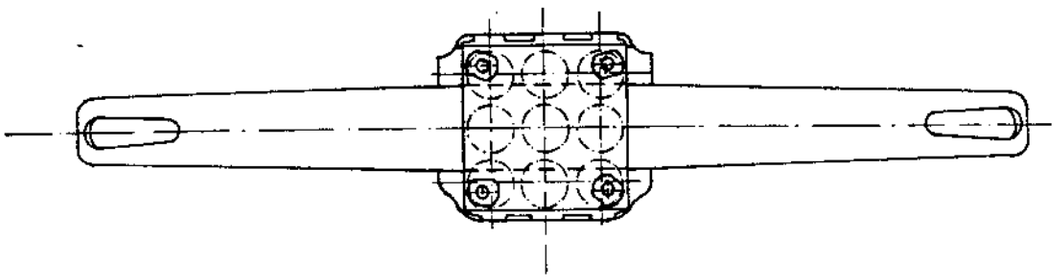


FIGURA 17 - Vista superior do dispositivo de aplicação de carga na lateral

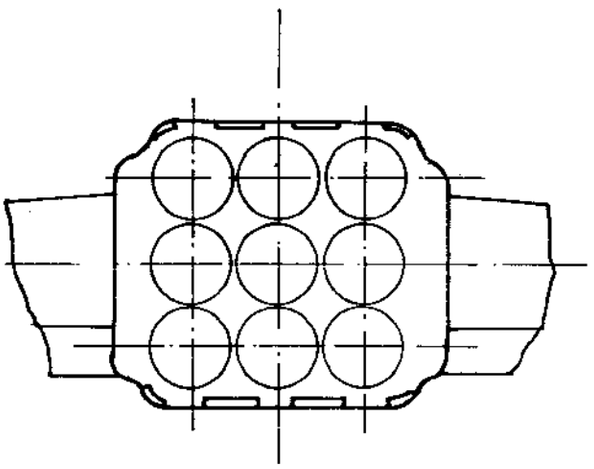


FIGURA 18 - Disposição dos cilindros de aço em substituição as molas para a distribuição de carga

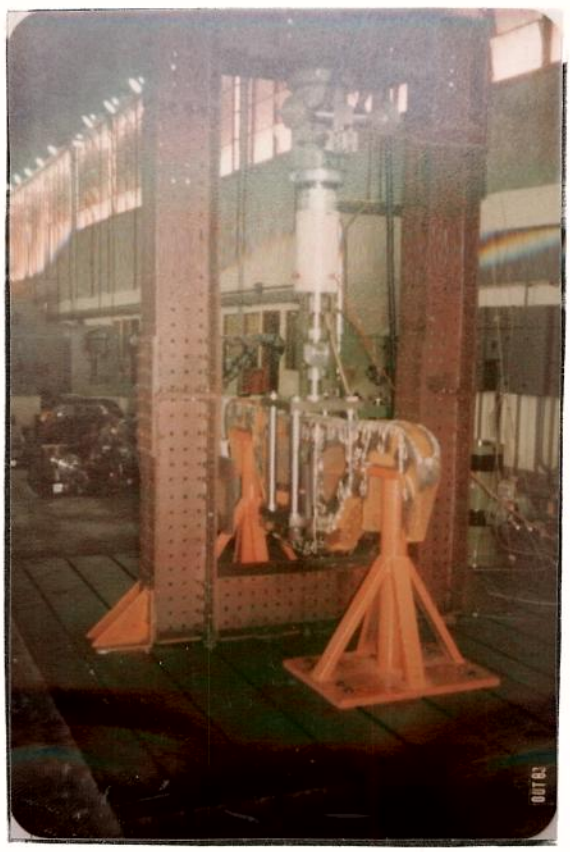


FOTO 6 - Lateral montada no banco de ensaios para o teste estático

5.4- EXECUÇÃO DOS TESTES

Após as devidas montagens no banco de ensaio, os extensômetros foram conectados a uma ponte amplificadora, com varredura automática de 100 canais por vez.

Procedeu-se então, a realização de pré-testes visando os últimos acertos no banco de ensaios, a detecção de extensômetros com possíveis defeitos, bem como a localização de problemas ocasionados por soldagens e contactos elétricos. Após a série de pré-testes, foram eliminados todos os problemas.

A seguir foram realizados os ensaios definitivos obedecendo ao procedimento descrito a seguir:

Em primeiro lugar, a lateral foi carregada com a força F_y de 300,0 kN de amplitude e aliviada logo em seguida por seis vezes consecutivas, a fim de se obter uma devida acomodação da estrutura.

Em segundo lugar, foi aplicada uma pré-carga de 5,0 kN . Nesta carga foram balanceados e zerados os canais da ponte amplificadora.

A seguir a lateral foi sendo carregada gradativamente até que a força F_y atingisse 300,0 kN e em seguida descarregada também gradativamente até que se atingisse o valor de 5,0 kN para a força F_y. As medidas das deformações apresentadas pelos extensômetros foram feitas tanto na carga como na descarga, em estágios de 50,0 kN, a fim de se observar a linearidade das mesmas.

O valor de 300,0 kN para a força F_y decorre das condições iniciais estabelecidas como básicas para o desenvolvimento deste trabalho, tanto no cálculo teórico, quanto nos experimentais (vide as considerações do item 3.3 com relação à amplitude da força de carregamento F_y na lateral).

A partir das medidas das deformações apresentadas pelos extensômetros, foram calculados os valores das amplitudes e direções das tensões nos 77 pontos da lateral.

Os valores encontrados mostraram uma perfeita linearidade das tensões em função das cargas aplicadas. Para a determinação dos níveis de tensões foram considerados os valores das tensões

correspondentes a força de 300,0 kN. [7, 8, 9 e 10]

Analogamente ao procedimento adotado na teoria dos elementos finitos e nos testes em campo, tendo em vista a simetria da peça (vide figuras 1 e 2), foram selecionados apenas os valores de tensão mais significativos, tanto para a determinação dos pontos críticos da estrutura, como para a comparação dos resultados fornecidos pelas três técnicas na determinação dos níveis de tensões.

O desenho 8 do Anexo II mostra a distribuição acima descrita, constando de 45 pontos característicos, a fim de representar os níveis de tensões na estrutura, haja visto sua simetria.

Os valores das tensões nos mesmos estão mostrados nos desenhos 9 e 10 do Anexo II, respectivamente para os extensômetros tipo linear e tipo roseta, analogamente ao critério de apresentação dos resultados utilizado na determinação dos níveis de tensões na lateral durante os testes em campo (item 4.4 do Capítulo IV). Da mesma forma que lá, através dos desenhos podem ser facilmente visualizados os níveis de tensões, bem como as direções e a identificação das mesmas (segmentos com setas nas extremidades significam tração, enquanto que segmentos com traços ortogonais nas extremidades significam compressão), além dos valores das amplitudes delas, medindo-se os comprimentos dos segmentos e comparando-os com as escalas dos desenhos.

Analogamente aos procedimentos adotados na teoria dos elementos finitos e nos testes em campo, os valores das tensões também foram apresentados em forma de tabelas, a fim de facilitar a comparação dos três métodos utilizados.

Para tanto, foram construídas as tabelas 6 e 7 do Anexo I que contêm respectivamente os valores das tensões axiais σ fornecidos pelos extensômetros lineares e os valores das tensões principais σ_1 e σ_2 e o ângulo α da direção de σ_1, fornecidos pelos extensômetros tipo roseta. O ângulo α define a direção da tensão principal de maior valor absoluto (σ_1), medido a partir do eixo X e no sentido anti-horário (vide observação 3 do item 3.5).

Obedecendo a convenção adotada, os sinais positivos (+) nos valores das amplitudes das tensões indicam tração, enquanto que sinais negativos (-) indicam compressão.

Nas tabelas 6 e 7 ainda aparecem os nūmeros dos elementos finitos, correspondentes aos pontos em que se situam os extensômetros, a fim de facilitar a comparação dos resultados, analogamente ao procedimento adotado nas Tabelas 4 e 5 do Anexo I.

VI- ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na análise dos resultados foram abordados aspectos , tanto quanto a intensidade dos níveis de tensões na lateral, como também quanto a distribuição das tensões ao longo da estrutura, além da realização da comparação dos três procedimentos utilizados para a determinação dos níveis de tensões, um teórico (Capítulo III), um prático em campo (Capítulo IV) e um prático em laboratório (Capítulo V).

6.2- ANÁLISE DOS RESULTADOS QUANTO A INTENSIDADE DAS TENSÕES

Os resultados obtidos com os três procedimentos utilizados, mostraram que o maior nível de tensão apresentado na lateral se encontra no raio da curvatura mais central da região destinada ao encaixe do mancal do rodeiro como mostra a figura 19. Esta região apresenta tensões de tração cujas intensidades e localizações mais precisas podem ser observadas nos desenhos 3, 4, 6, 7, 9 e 10 do Anexo II, como também nas tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do Anexo I.

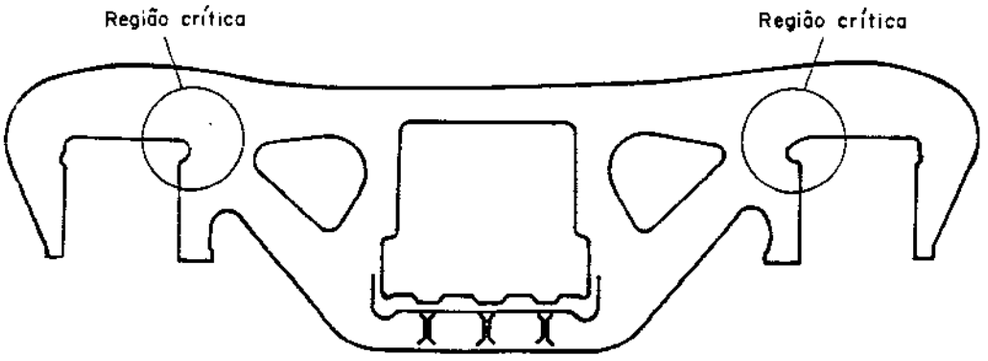


FIGURA 19 - Regiões da lateral que apresentam os níveis de tensões mais elevadas

Este nível de tensões destaca-se dos demais em intensidade, devido a região apresentar um raio de curvatura acentuado, associado a um momento resistente inferior ao das outras. Além disso, a condição de carregamento da lateral provoca a tração desta região.

O maior valor de tensão encontrado nesta região para um carregamento de 300,0 kN foi de 50,8 N/mm², obtido no ensaio estático (Capítulo V). Este valor é bastante aceitável para o material da estrutura no caso de cargas estáticas, pois o menor limite de escoamento apresentado pelo material na realização da determinação das propriedades mecânicas do mesmo (Capítulo II), correspondeu a uma tensão de 339,0 N/mm², como pode ser observado na Tabela 1 do Anexo I. Desta forma, tais regiões foram consideradas as mais críticas da lateral. [1]

6.3- DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES AO LONGO DA ESTRUTURA

Para se ter uma perfeita visualização da distribuição das tensões ao longo da estrutura, basta que sejam observados os desenhos 3, 4, 6, 7, 9 e 10 do Anexo II, em particular o 3 e o 4, referente a determinação dos níveis de tensões na lateral através da teoria dos elementos finitos (vide Capítulo III). Isto se deve ao fato de ter sido criado um grande número de elementos no modelo estrutural,obtendo-se desta forma, igual número de resultados para as tensões na estrutura (vide desenhos 1 e 2 do Anexo II).

Nos desenhos acima citados, podem ser observadas as distribuições e os níveis das tensões na lateral, além da propagação das mesmas na estrutura, mostrando como elas variam em amplitude e direção de ponto para ponto. Também podem ser observados os pontos em que as tensões mudam de sinal, passando de tração para compressão e vice-versa, ficando determinados desta forma, os pontos com tensão nula. Com isso, podem ser traçadas as curvas de propagação das tensões para estudos posteriores, como também podem ser explicadas algumas diferenças de resultados de tensão ocorridos na comparação dos três procedimentos utilizados, objeto do item seguinte.

6.4- COMPARAÇÃO DOS TRÊS PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÕES

A análise dos resultados propiciou a comparação dos três procedimentos utilizados na determinação dos níveis de tensões na lateral de um truque ferroviário, um procedimento teórico que consistiu da teoria dos elementos finitos e dois procedimentos práticos que consistiram da técnica da extensômetria aplicada em um teste de campo e um ensaio em laboratório, como descrito nos Capítulos III, IV e V respectivamente.

A comparação dos níveis de tensões na lateral obtidos com os três procedimentos utilizados, pode ser feita através dos resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3 do Anexo I e nos desenhos 3 e 4 do Anexo II para a teoria dos elementos finitos; nas Tabelas 4 e 5 do Anexo I e nos desenhos 6 e 7 do Anexo II para a técnica da extensometria no teste em campo; e nas Tabelas 6 e 7 do Anexo I e nos desenhos 9 e 10 do Anexo II para a técnica da extensometria no ensaio de laboratório.

Assim sendo, foram determinadas as diferenças dos valores das tensões apresentadas pelos três procedimentos para cada ponto de medida. A fim de se obter um parâmetro de comparação, foram construídas as Tabelas 8 e 9 do Anexo I, nas quais constam as diferenças entre os valores das tensões obtidas através de cada um dos procedimentos práticos e o teórico, diferenças estas expressas tanto em N/mm^2 como percentualmente, tomadas em relação ao procedimento teórico.

A Tabela 8 mostra as diferenças entre os resultados obtidos através da teoria dos elementos finitos e da técnica da extensometria no teste em campo. A Tabela 9 mostra as diferenças entre os resultados obtidos através da teoria dos elementos finitos e da técnica da extensometria no ensaio de laboratório. Em ambos os casos, as comparações dos valores das tensões apresentadas pelos elementos de chapa e pelas rosetas foram feitas levando-se em conta apenas as tensões principais σ_1 que são as de maiores valores absolutos.

Analisando os valores das tabelas do Anexo I conjuntamente com os desenhos do Anexo II, observou-se o seguinte:

Em todos os pontos comparados não foi obtida nenhuma diferença significativa quanto aos valores das intensidades das tensões. Como prova disso, tomemos o elemento de chapa número 37, que tem como correspondentes os pontos referentes aos extensômetros número 5 e número 44, respectivamente para o teste em campo e para o teste em laboratório.

Este ponto apresentou a maior diferença no valor da tensão para os três procedimentos, que foi de 24,8 N/mm² entre o teórico e o prático em campo e de 22,7 N/mm² entre o teórico e o prático em laboratório. Com relação as direções das tensões não houve praticamente nenhuma diferença.

Neste local, região inferior lateral da estrutura próxima a base dos assentos das molas da suspensão da viga (vide desenhos 2, 5 e 8 do Anexo II), a secção apresenta um momento de inércia bastante grande, além de uma série de nervuras tanto externas como internas. Nestes casos, no cálculo teórico fica mais difícil de se determinar um elemento finito bidimensional com um alto grau de precisão, razão da diferença apresentada. Outro fato que influenciou nesta diferença foram a presença de raios de curvaturas próximas ao elemento, e como de antemão, não se esperava um alto nível de tensão nesta região, foram construídos elementos de maior tamanho e em menor número fazendo com que no cálculo teórico se fugisse um pouco da realidade. [14]

Prova disso é que nos procedimentos práticos, a diferença apresentada foi de apenas 0,5 N/mm² que é completamente desprezível.

Nos demais pontos, as diferenças dos valores das intensidades das tensões foram inferiores ao acima citado, tendo sido observados casos semelhantes (elemento de viga número 1). Nas regiões das inflexões das curvas de sentido das tensões foram observadas várias diferenças devidas aos extensômetros não terem sido aplicados exatamente no centro do elemento finito correspondente.

Um exemplo característico disso pode ser observado analisando-se o ponto correspondente ao elemento de viga número 104 que esta localizado numa região em que a tensão decresce de intensidade de forma brusca de um ponto para o outro, como mostra o desenho 1 do Anexo II. Neste caso, o elemento forneceu o valor de -4,2

N/mm^2 e o extensômetro número 38 do teste em laboratório forneceu o valor de -23,7 N/mm^2, significando que ele não foi aplicado exatamente sobre o elemento correspondente. Outro caso interessante é o elemento de viga número 74 que apresenta tração de 1,5 N/mm^2 e o extensômetro número 31 do teste de laboratório que apresentou compressão de -5,4 N/mm^2.

Outro fato interessante que indica diferenças nos valores das tensões ocorreu nos pontos onde o elemento finito considerado continha mais de um extensômetro devido as dimensões dos elementos e dos extensômetros. Com isso, houve casos de se ter 2, 3 e até 4 extensômetros em um mesmo elemento finito. Este fato ocorreu no ensaio de laboratório onde foram utilizados um número maior de extensômetros na estrutura.

Como exemplo, podemos observar os elementos de viga números 45, 48, 31, 32 e 133 (vide Tabela 9) que apresentam as variações mais significativas nas diferenças dos resultados fornecidos pelos extensômetros correspondentes. Na realidade isso não é um erro pois no cálculo teórico o elemento abrange uma certa região e na determinação experimental para a mesma região é feita a análise de mais de um ponto da mesma.

Foram observadas grandes diferenças percentuais em certos pontos porém trataram-se dos pontos que apresentaram níveis de tensões demasiadamente baixos, ocasionando desta forma, tais diferenças. Um exemplo disso pode ser observado pelos resultados do elemento de viga número 133 que apresentou uma tensão de compressão de 0,1 N/mm^2.

Nos demais pontos as diferenças ficaram num nível bastante aceitável. Também os ângulos das tensões principais nos casos dos elementos de chapa e das rosetas não apresentaram diferenças significativas, razão pela qual não se fez necessária tabela de comparação dos valores.

Para finalizar a análise dos resultados , foi observado que entre os dois procedimentos práticos, a extensometria aplicada no campo e no laboratório não foram observadas diferenças signi

ficativas, razão pela qual também não foram feitas tabelas de comparação dos resultados, ficando os devidos comentários para o Capítulo seguinte que são as conclusões.

VII- CONCLUSÕES

7.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões a respeito dos níveis de tensões obtidos, a comparação dos três procedimentos utilizados e trabalhos futuros.

7.2- NÍVEIS DE TENSÕES

Os níveis de tensões obtidos para a lateral do truque sob a ação de um carregamento estático vertical correspondente a uma carga de 30,0 toneladas por eixo do truque, mostraram-se bastante baixos quando comparados com os limites de escoamento e de resistência do material, os quais constam da Tabela 1 do Anexo 1 . Isto ocorreu nos três procedimentos adotados que são a teoria dos elementos finitos e a técnica da extensometria utilizada tanto no teste de campo como em laboratório.

A explicação para isso se baseia no fato de que neste tipo de truque as laterais e a viga do mesmo são feitas de aço fundido, além das estruturas apresentarem grandes dimensões e em peças com estas características é comum a existência de pequenos vazios de fundição no material, devido ao processo de fabricação.

Para eliminar a possível interferência dos citados vazios de fundição na resistência da estrutura, as suas paredes são dimensionadas com uma certa quantidade de sobremetal , implicando num aumento de espessura e consequentemente num aumento de rigidez.

Assim sendo, ficam justificadas as baixas intensidades dos níveis de tensões obtidos na lateral quando comparados com o limite de resistência do material.

Os níveis de tensões obtidos, indicaram no entanto , a localização das regiões mais críticas da estrutura, como mostra a figura 19, o que serve de base para estudos futuros que venham a ser necessários, tais como a obtenção de tensões sob a ação de car

gas dinâmicas, reprojeto ou adequação da lateral para novas condições de operação, etc.

Do exposto acima, chega-se a conclusão de que o objetivo deste trabalho foi atingido, pois a determinação dos níveis de tensões na lateral do truque ficou bem definido.

7.3- COMPARAÇÃO DOS TRÊS PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Como citado no início do trabalho (Capítulos I e III) , a determinação dos níveis de tensões através da teoria dos elementos finitos, foi proposta para fornecer a localização dos pontos mais críticos da estrutura, a fim de se determinar os pontos a serem aplicados os extensômetros no teste de laboratório. Com o intúito de enriquecer o trabalho, também foram determinados os níveis de tensões nas laterais durante as viagens de medições no teste em campo.

No entanto, os resultados obtidos propiciaram através da análise dos resultados, uma perfeita comparação dos três procedimentos utilizados, permitindo desta forma que se chegasse a conclusões muito importantes a respeito. Estas conclusões foram as seguintes:

1ª) Os três procedimentos adotados forneceram resultados bastante parecidos, levando-se em conta as devidas explicações apresentadas no Capítulo VI,que esclarecem certas diferenças de valores de tensão em alguns pontos da estrutura.

2ª) O procedimento teórico mostrou-se bastante eficiente na determinação dos pontos mais críticos da estrutura e seus resultados mostraram que o mesmo pode ser utilizado com segurança e eficiência na determinação de níveis de tensões.

3ª) No cálculo através da teoria dos elementos finitos , uma otimização tanto na confecção da malha de nós, como também nas condições de carregamento e fixação do modelo estrutural, contribuirá para que sejam obtidos resultados mais

próximos dos que ocorrem na realidade. Isso implica em se obter uma simulação teórica mais perfeita, o que significa maior confiabilidade no procedimento adotado.

4ª) Os resultados obtidos no ensaio de campo e de laboratório ficaram muito próximos mostrando que a simulação utilizada no segundo caso foi muito boa, pois refletiu exatamente as condições reais de operação da lateral no truque . Ainda mais, ficou provado que a componente lateral da força tem muito pouca influência nos níveis de tensões da lateral, de acordo com a consideração feita no item 3.3 do Capítulo III, onde foram determinadas as condições de carregamento e de fixação do modelo estrutural no caso do cálculo teórico, e da lateral no caso do ensaio em laboratório.

5ª) Do exposto acima, concluiu-se que o objetivo deste trabalho não só foi atingido como também enriquecido, pois os procedimentos que seriam utilizados apenas para orientação mostraram-se também eficazes na determinação dos níveis de tensões na lateral deste tipo de truque.

7.4- TRABALHOS FUTUROS

Os resultados e as conclusões obtidas no presente trabalho, serão utilizados numa continuação e de forma complementar deste. Trata-se da determinação da resistência à fadiga de truques ferroviários sob a ação de cargas dinâmicas aplicadas nos mesmos em laboratório, a partir de programas especiais determinados através dos dados obtidos nos testes em campo, e dos níveis de tensões aqui obtidos.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

ANEXO I

TABELA 1

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL DA LATERAL OBTIDAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NOS QUATRO CORPOS DE PROVA RETIRADOS DA ESTRUTURA

NUMERO DO CORPO DE PROVA	LIMITE DE ESCOAMENTO A 0,2%[N/mm²]	LIMITE DE RESISTÊNCIA [N/mm²]	ALONGAMENTO [%]	ESTRICÇÃO [%]
1	355,0	590,0	18,8	26,7
2	339,0	561,0	20,2	36,0
3	352,0	580,0	26,4	43,4
4	365,0	592,0	23,0	46,6

TABELA 2

VALORES DAS TENSÕES NA LATERAL FORNECIDAS PELOS ELEMENTOS FINITOS DE VIGA, ATRAVES DO CÁLCULO TEÓRICO SIMULANDO-SE UM CARREGAMENTO DA ESTRUTURA COM UMA FORÇA VERTICAL DE 300,0 kN

ELEMENTO FINITO DE VIGA	σ [N/mm²]
1	+39,0
31	+26,3
32	+37,9
33	+42,4
34	+43,4
35	+36,8
36	+31,3
45	+ 6,5
46	+ 7,9
47	+ 5,5
48	+ 4,7
74	+ 1,5
80	-16,5
96	-23,2
104	- 4,2
128	+20,2
133	- 0,1
134	-12,8
135	-23,4
145	+25,5
154	- 3,7

TABELA 3

VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS σ_1 E σ_2 E DO ÂNGULO α DE σ_1 NA LATERAL, FORNECIDOS PELOS ELEMENTOS FINITOS DE CHAPA ATRAVES DO CÁLCULO TEÓRICO SIMULANDO-SE UM CARREGAMENTO DA ESTRUTURA COM UMA FORÇA VERTICAL DE 300,0 kN

ELEMENTO FINITO DE CHAPA	σ_1 [N/mm²]	σ_2 [N/mm²]	α [GRAUS]
34	-20,4	- 0,5	1,0
37	+47,0	-29,1	43,5
175	+20,5	- 1,0	43,0
200	-14,6	- 3,1	169,5
203	+21,9	+ 0,9	40,5
239	+28,5	- 8,7	33,0
283	-25,8	+18,7	138,0
301	+13,4	+ 2,8	43,6

TABELA 4

VALORES DAS TENSÕES AXIAIS σ NA LATERAL DURANTE OS TESTES EM CAMPO, OBTIDAS ATRAVÉS DOS EXTENSÔMETROS LINEARES PARA UM CARREGAMENTO DE 30,0 TONELADAS POR EIXO

NUMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO DE VIGA CORRESPONDENTE	σ [N/mm²]
2	34	+43,3
3	135	- 8,8
4	145	+22,0
7	96	-18,7
8	1	+25,8

TABELA 5

VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS σ_1 E σ_2 E DO ANGULO α DE σ_1 NA LATERAL DURANTE OS TESTES EM CAMPO, OBTIDAS ATRAVÉS DOS EXTENSÔMETROS TIPO ROSETA PARA UM CARREGAMENTO DE 30,0 TONELADAS POR EIXO

NUMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO DE CHAPA CORRESPONDENTE	σ_1 [N/mm²]	σ_2 [N/mm²]	α [GRAUS]
1	301	+18,8	+ 4,2	40,0
5	37	+22,2	-10,0	42,6
6	34	-15,0	- 0,6	2,4

TABELA 6

VALORES DAS TENSOES AXIAIS σ NA LATERAL NO ENSAIO DE LABORATÓRIO, OBTIDOS ATRAVÉS DOS EXTENSÔMETROS LINEARES CORRESPONDENTE A UM CARREGAMENTO DA ESTRUTURA COM UMA FORÇA VERTICAL F_y DE 300,0 kN

NUMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO DE VIGA CORRESPONDENTE	σ [N/mm²]
1	45	+ 5,8
2	45	+ 6,6
3	45	+ 7,6
4	46	+ 8,3
5	46	+ 7,4
6	46	+ 6,6
7	47	+ 6,0
8	47	+ 5,2
9	48	+ 4,8
10	48	+ 3,9
11	31	+27,1
12	31	+32,7
13	32	+41,8
14	32	+47,3
15	33	+48,0
16	33	+48,4
17	34	+49,6
18	34	+50,8
19	35	+50,6

TABELA 6 (Cont.)

VALORES DAS TENSÕES AXIAIS σ NA LATERAL NO ENSAIO DE LABORATÓRIO, OBTIDOS ATRAVES DOS EXTENSÔMETROS LINEARES CORRESPONDENTE A UM CARREGAMENTO DA ESTRUTURA COM UMA FORÇA VERTICAL F_y DE 300,0 kN

NUMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO DE VIGA CORRESPONDENTE	σ [N/mm²]
20	36	+49,4
21	135	- 9,3
22	135	- 9,6
23	135	- 9,5
24	134	- 9,2
25	134	- 9,1
26	134	- 8,9
27	134	- 9,0
28	133	- 8,0
29	133	- 7,0
30	133	- 6,4
31	74	- 5,4
32	80	-22,3
33	96	-20,2
34	145	+24,9
35	154	+ 4,7
36	128	+19,4
37	1	+27,7
38	104	-23,7

TABELA 7

VALORES DAS TENSOES PRINCIPAIS σ_1 E σ_2 E DO ÂNGULO α DE σ_1 NA LATERAL DURANTE O ENSAIO DE LABORATORIO, OBTIDOS ATRAVES DOS EXTENSÔMETROS TIPO ROSETA CORRESPONDENTE A UM CARREGAMENTO DA ESTRUTURA COM UMA FORÇA VERTICAL DE 300,0 kN

NUMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO DE CHAPA CORRESPONDENTE	σ_1 [N/mm²]	σ_2 [N/mm²]	α [GRAUS]
39	283	-18,8	+12,2	156,9
40	200	-12,8	+ 0,7	2,1
41	239	+18,9	- 1,8	35,3
42	203	+21,6	- 0,6	39,2
43	175	+18,9	+ 0,4	37,6
44	37	+24,3	-13,8	43,0
45	34	-18,2	- 0,8	3,7

TABELA 8

DIFERENÇAS APRESENTADAS ENTRE OS VALORES DAS TENSÕES OBTIDOS ATRAVÉS DA TEORIA DOS ELEMENTOS FINITOS E DA TÉCNICA DA EXTENSOMETRIA NO TESTE EM CAMPO

NÚMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO CORRES - PONDENTE	DIFERENÇA APRESENTADA	
		[N/mm²]	[%]
1	301 *	5,4	40,3
2	34	0,1	0,2
3	135	14,6	62,4
4	145	3,5	13,7
5 *	37 *	24,8	52,7
6 *	34 *	5,4	26,5
7	96	4,5	19,4
8	1	13,2	33,8

* Rosetas e Elemento Finito de Chapa

TABELA 9

DIFERENÇAS APRESENTADAS ENTRE OS VALORES DAS TENSÕES OBTIDOS ATRAVÉS DA TEORIA DOS ELEMENTOS FINITOS E DA TÉCNICA DA EXTENSOMETRIA NO ENSAIO DE LABORATÓRIO

NÚMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO CORRES - PONDENTE	DIFERENÇA APRESENTADA	
		[N/mm²]	[%]
1	45	0,7	12,0
2	45	0,1	1,5
3	45	1,1	16,9
4	46	0,4	5,0
5	46	0,5	6,3
6	46	1,5	19,7
7	47	1,5	9,0
8	47	0,3	5,4
9	48	0,1	2,1
10	48	0,8	20,5
11	31	0,8	3,0
12	31	6,4	24,3
13	32	3,9	10,2
14	32	9,4	24,8
15	33	5,6	13,2
16	33	6,0	14,1
17	34	6,2	14,3
18	34	7,4	17,0
19	35	13,8	37,5
20	36	18,1	57,8
21	135	14,1	60,2
22	135	13,8	58,9
23	135	13,9	59,4
24	134	3,6	28,1
25	134	3,7	28,9
26	134	3,9	30,4
27	134	3,8	29,6

TABELA 9 (Cont.)

DIFERENÇAS APRESENTADAS ENTRE OS VALORES DAS TENSÕES OBTIDOS ATRAVÉS DA TEORIA DOS ELEMENTOS FINITOS E DA TÉCNICA DA EXTENSOMETRIA NO ENSAIO DE LABORATÓRIO

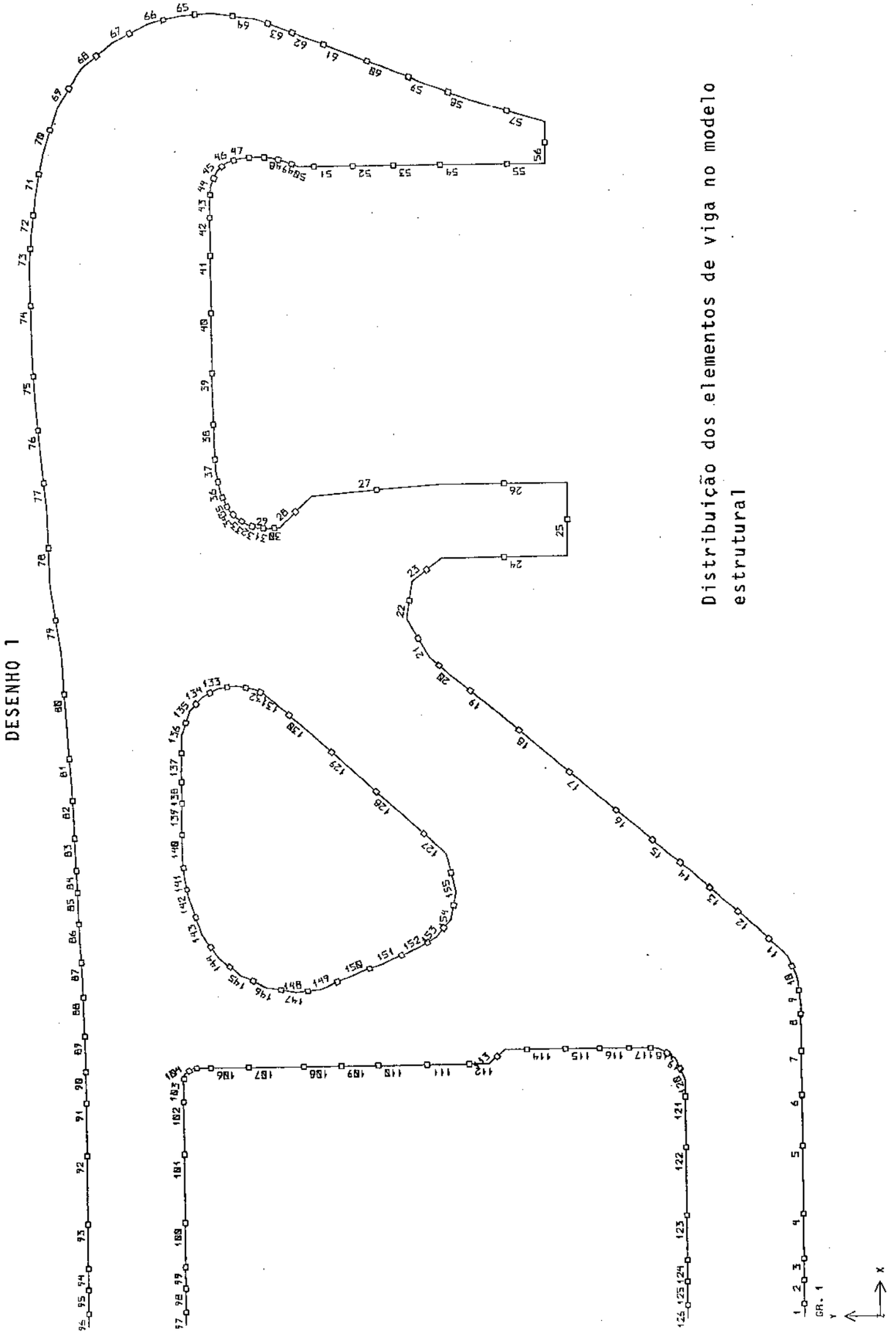
NÚMERO DO EXTENSÔMETRO	ELEMENTO CORRES - PONDENTE	DIFERENÇA APRESENTADA	
		[N/mm²]	[%]
28	133	7,9	7.900,0
29	133	6,9	6.900,0
30	133	6,3	6.400,0
31	74	6,9	360,0
32	80	5,8	35,1
33	96	3,0	14,8
34	145	0,6	2,3
35	154	1,0	127,0
36	128	0,8	4,0
37	1	11,3	29,0
38	104	19,2	364,0
39 *	283 *	7,0	27,1
40 *	200 *	1,8	12,3
41 *	239 *	10,4	33,7
42 *	203 *	0,3	1,4
43 *	175 *	0,6	7,8
44 *	37 *	22,7	48,3
45 *	34 *	2,2	10,8

* Rosetas e Elemento Finito de Chapa

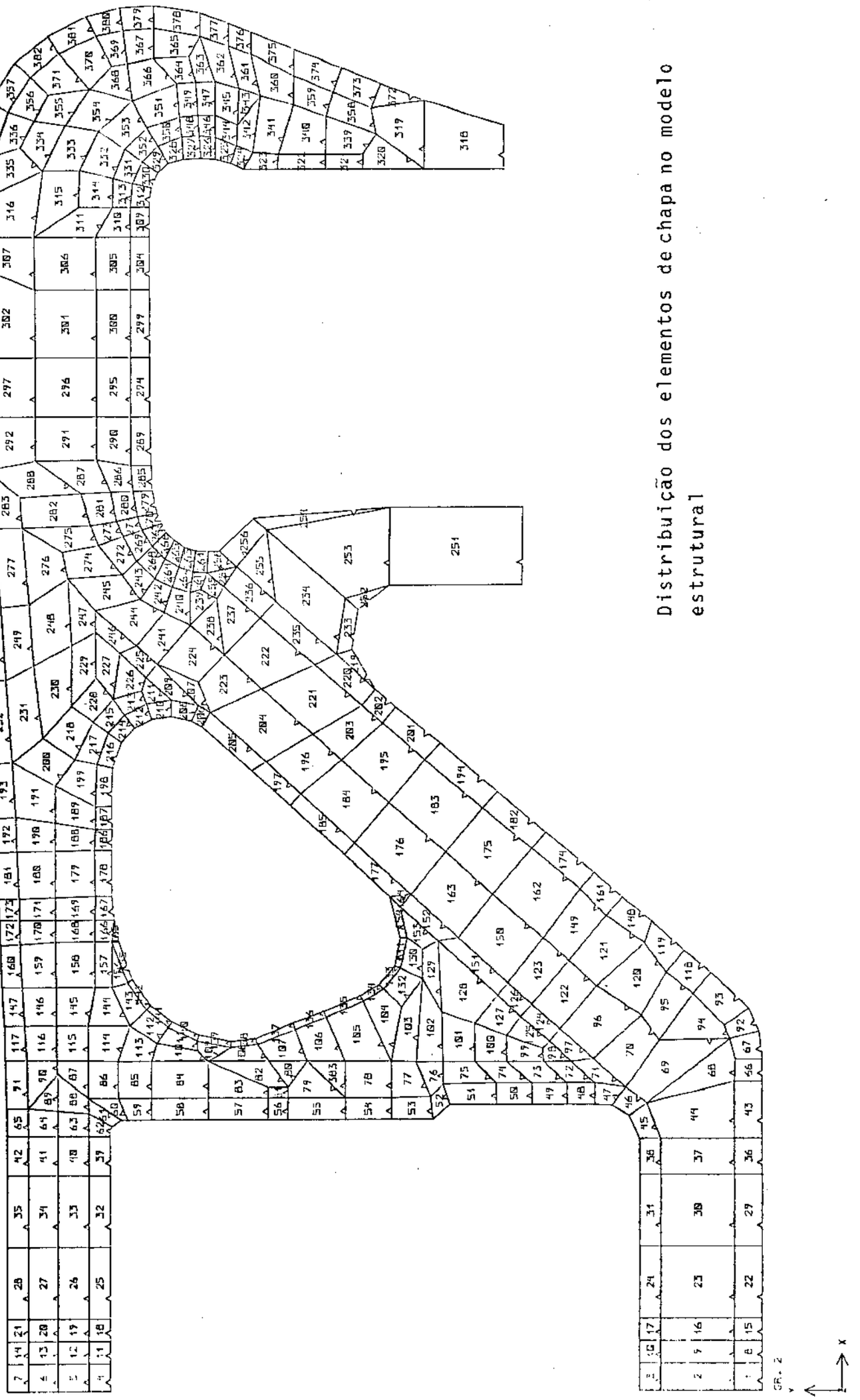
ANEXO II

DESENHO 1

Distribuição dos elementos de viga no modelo estrutural

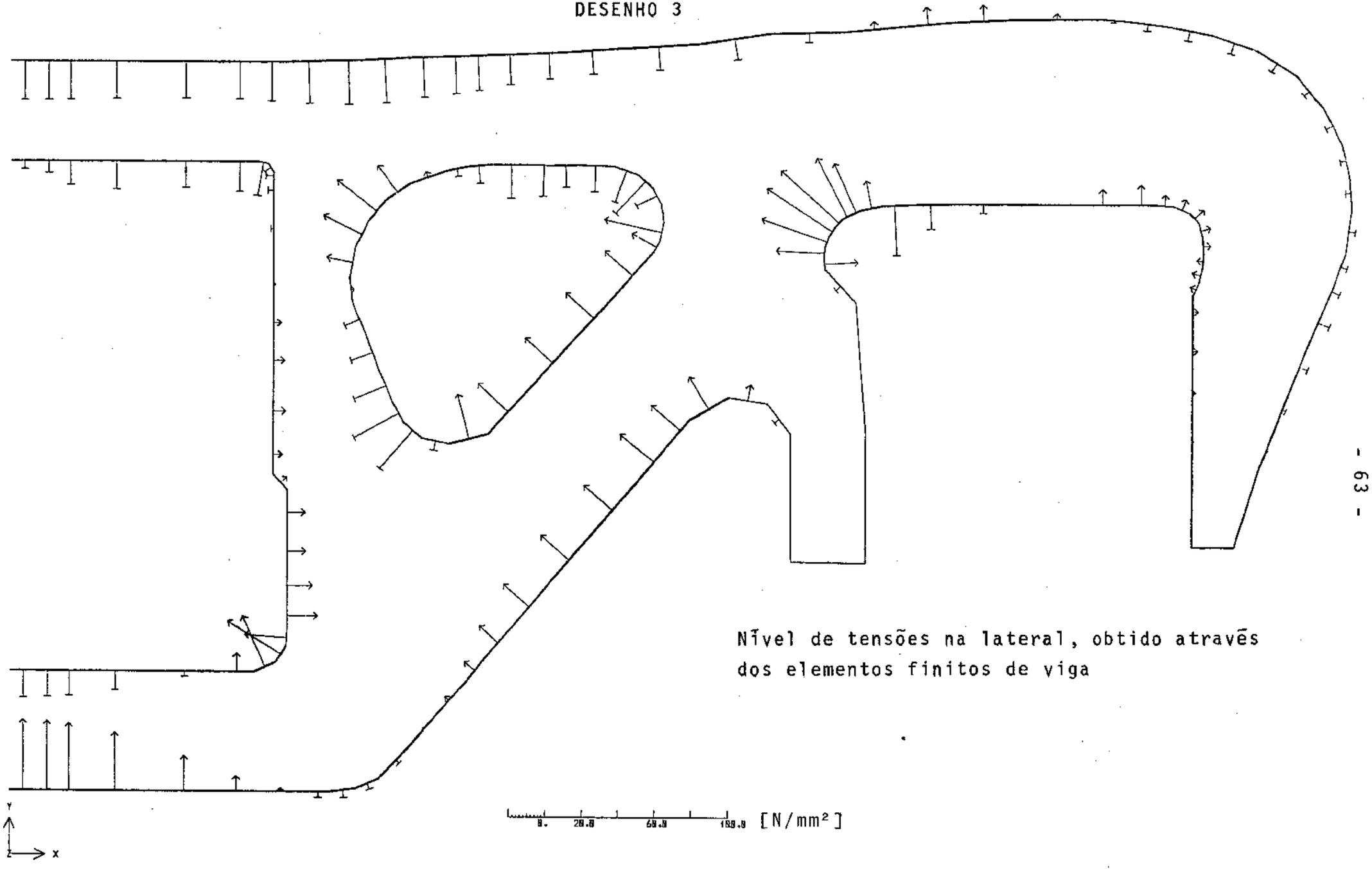


DESENHO 2



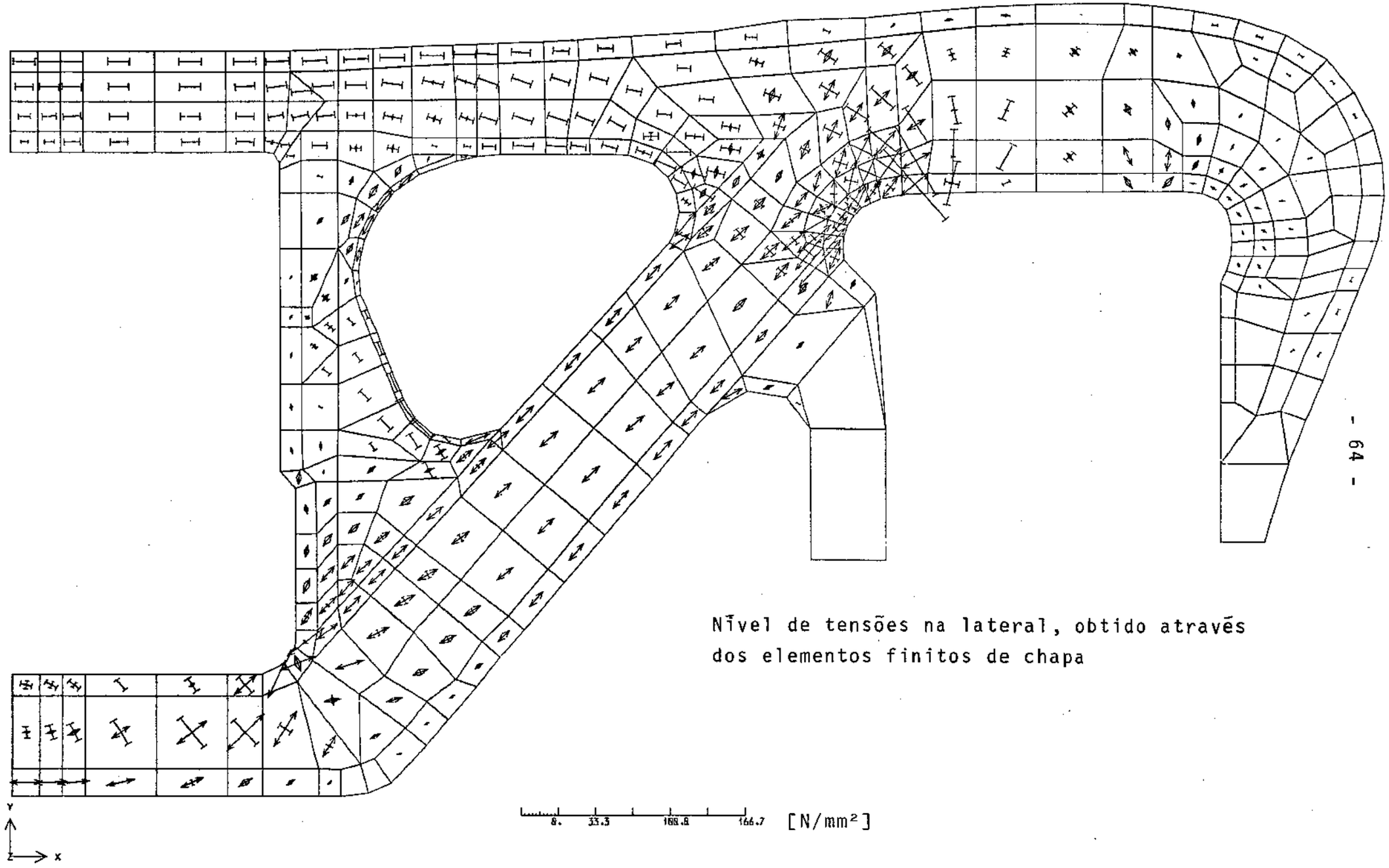
Distribuição dos elementos de chapa no modelo estrutural

DESENHO 3



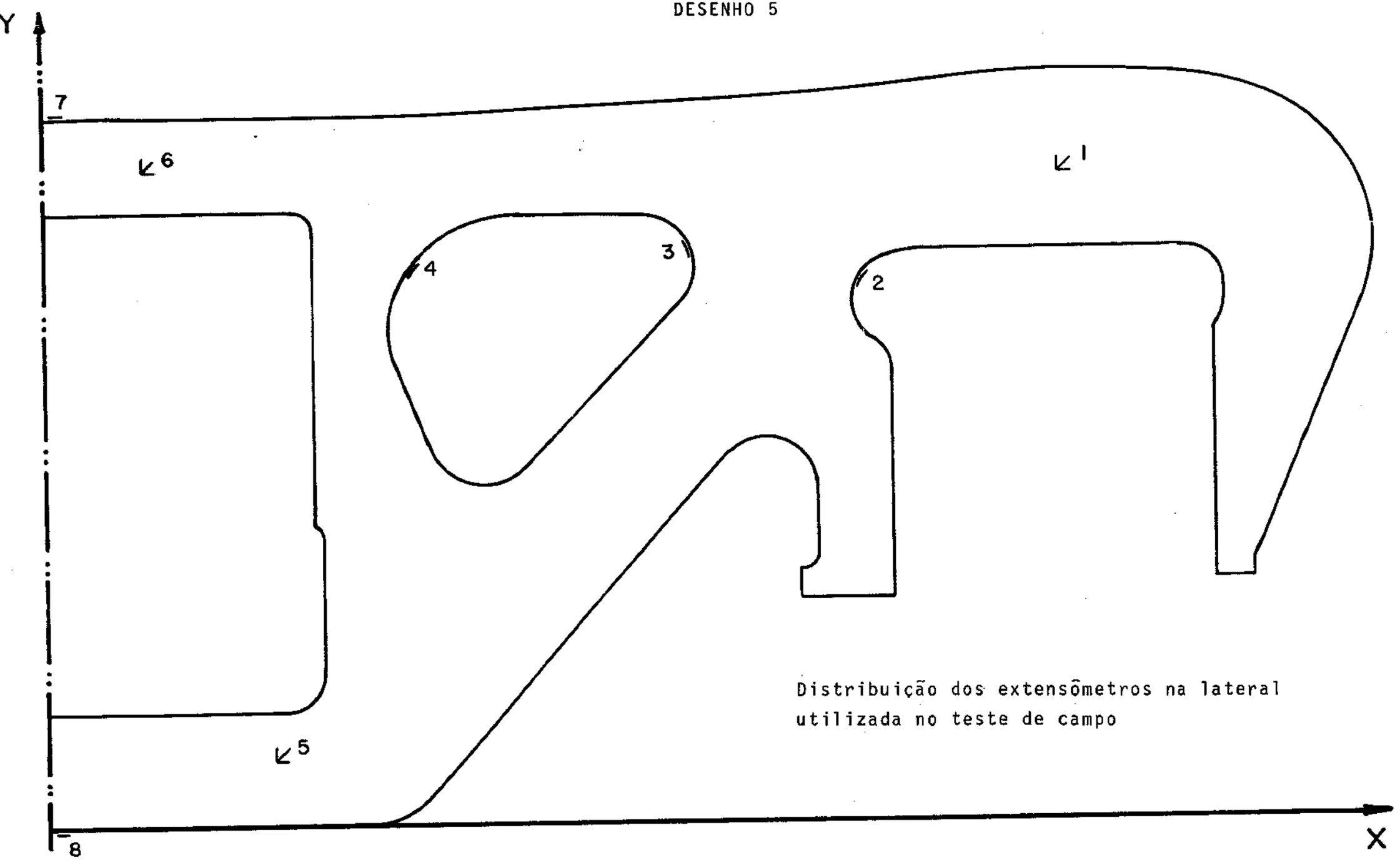
Nível de tensões na lateral, obtido através dos elementos finitos de viga

DESENHO 4

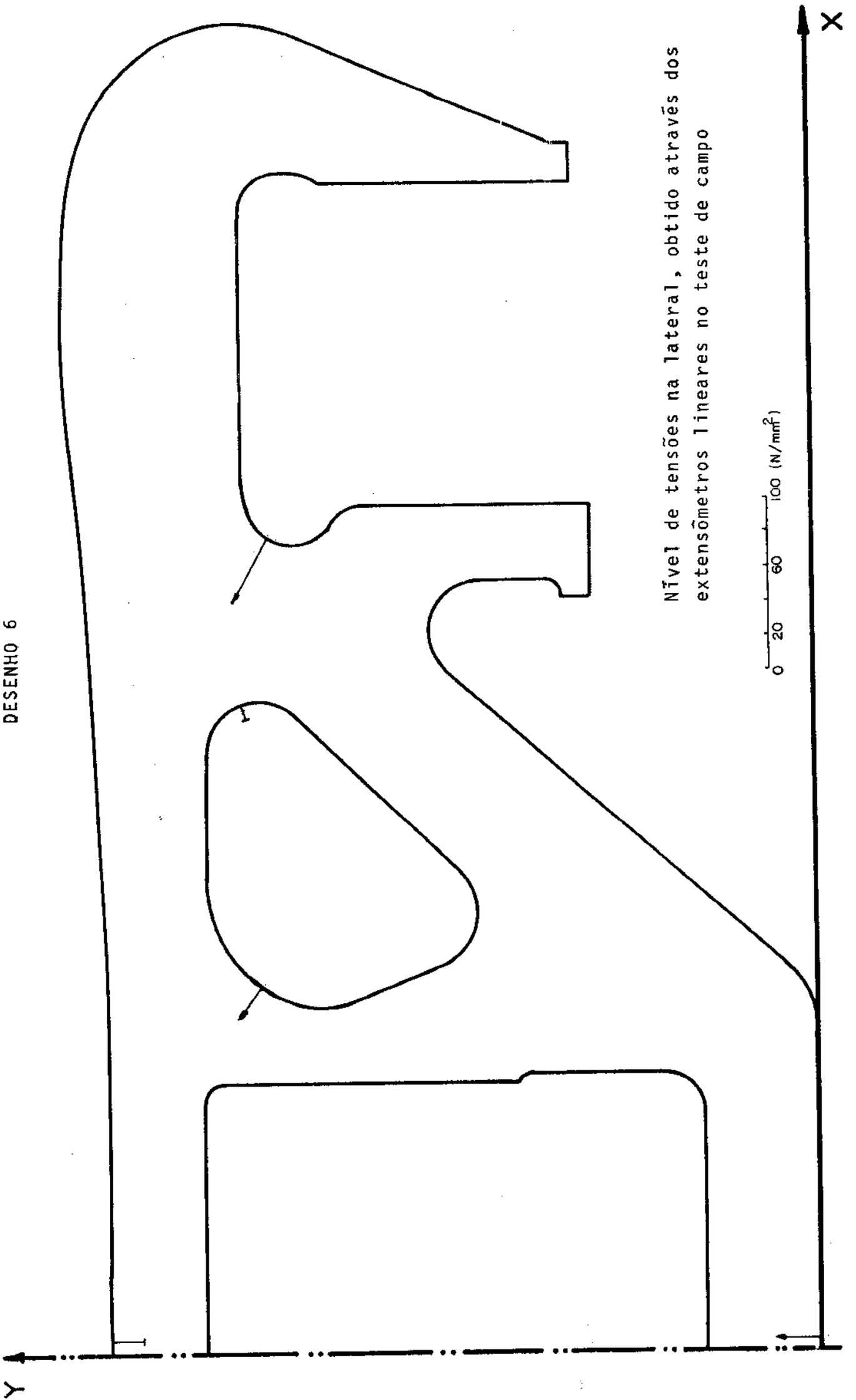


Nível de tensões na lateral, obtido através dos elementos finitos de chapa

DESENHO 5

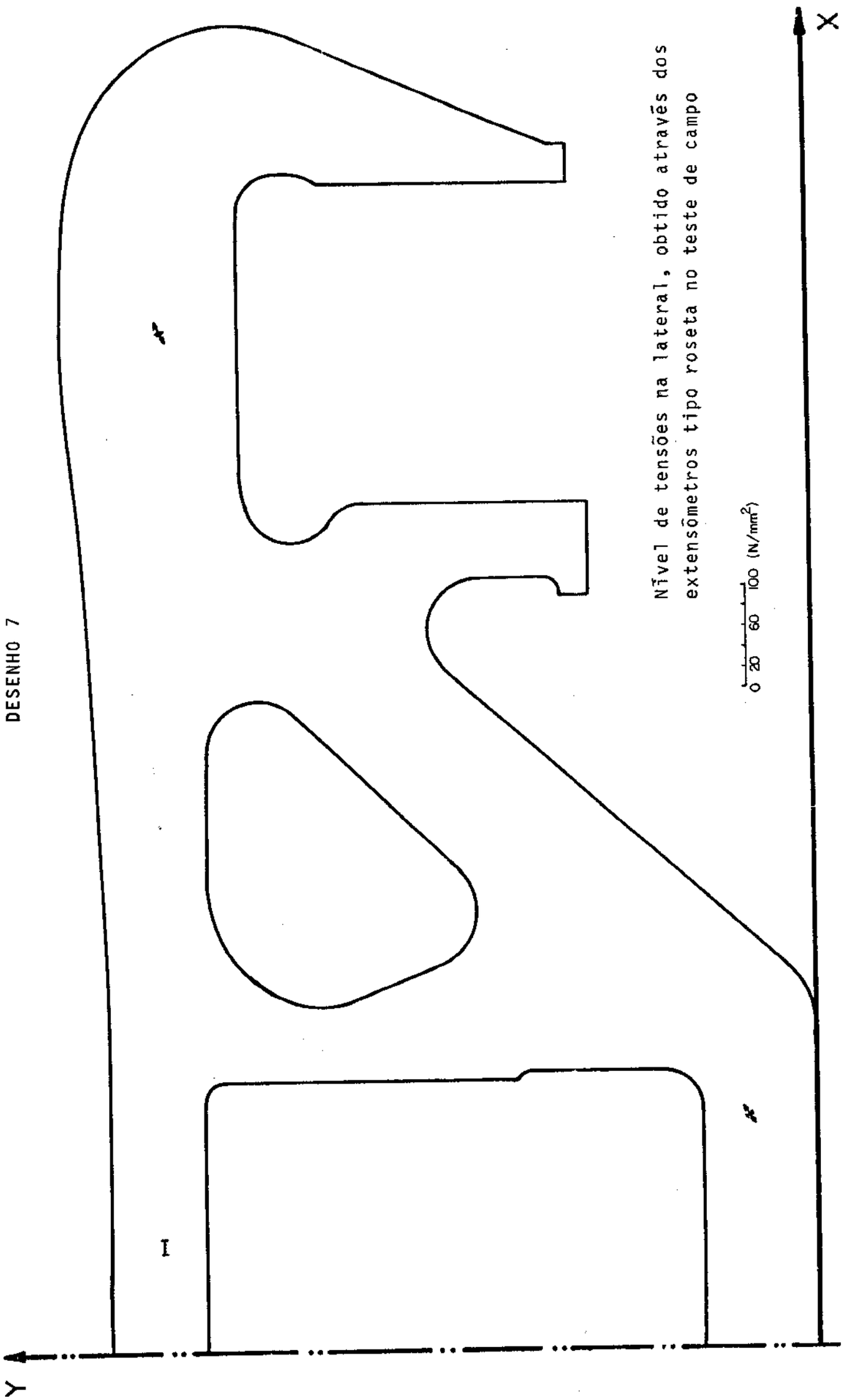


Distribuição dos extensômetros na lateral utilizada no teste de campo

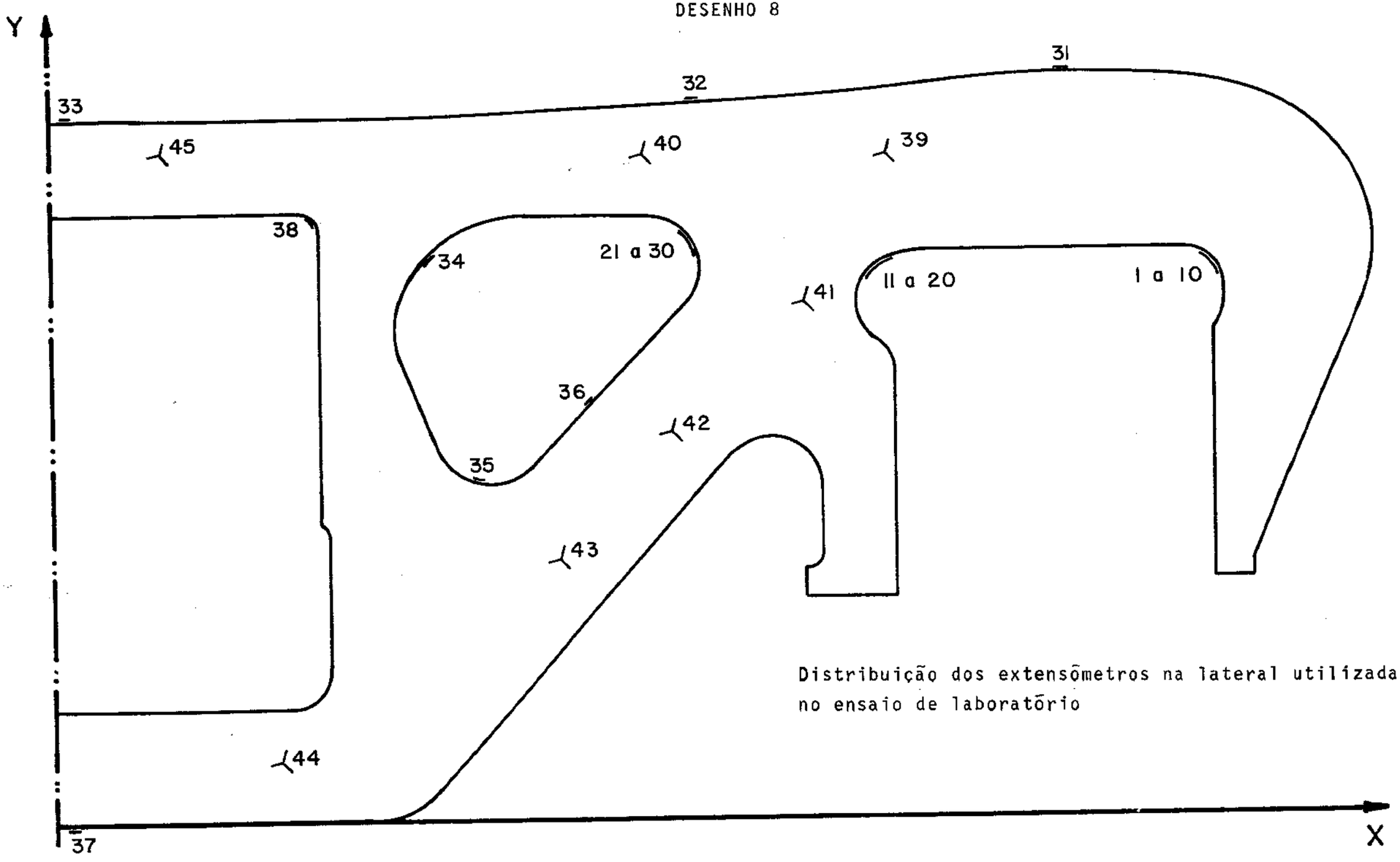

Nível de tensões na lateral, obtido através dos extensômetros lineares no teste de campo
0 20 60 100 (N/mm²)
X
Y

DESENHO 6

DESENHO 7

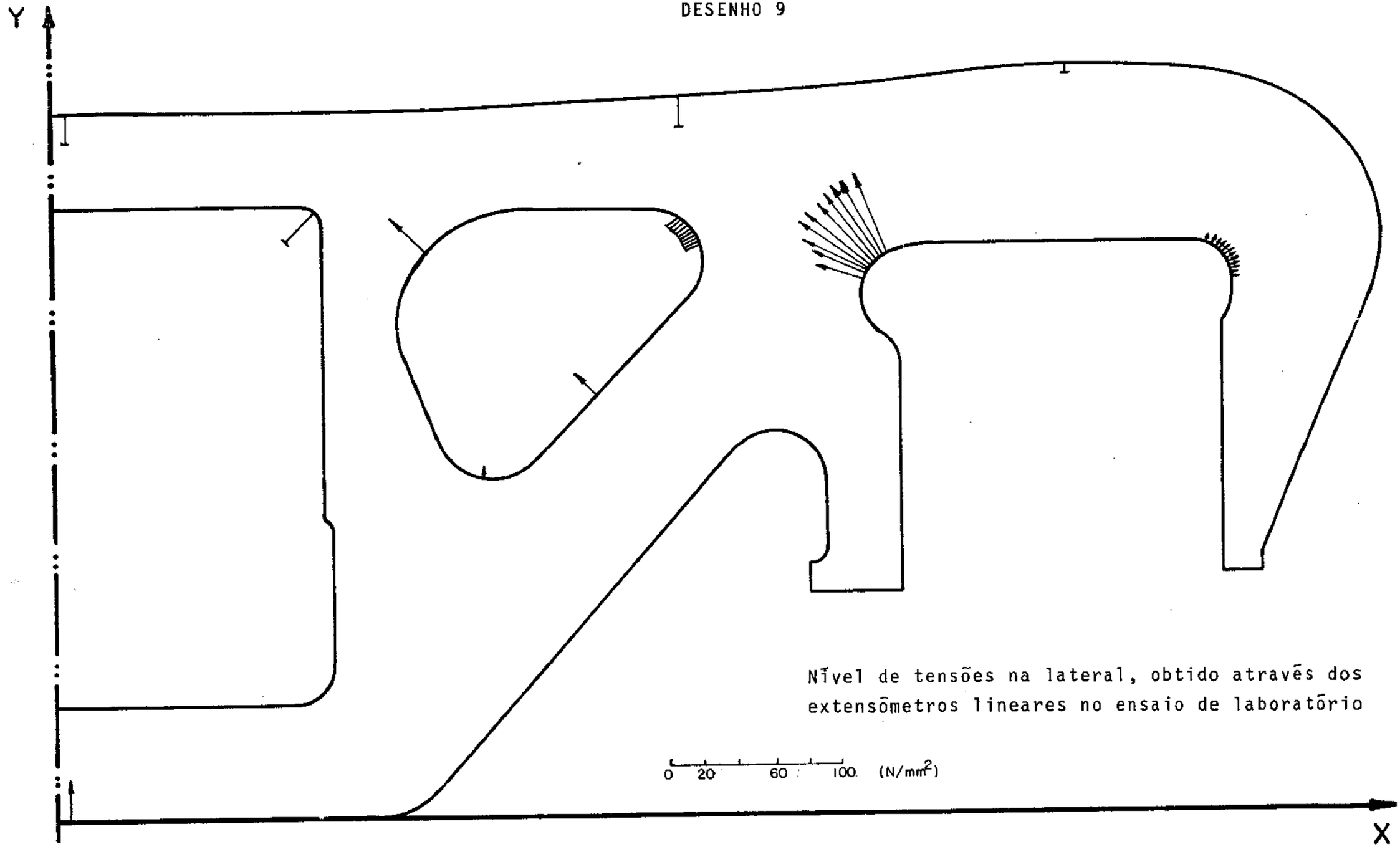

Nível de tensões na lateral, obtido através dos extensômetros tipo roseta no teste de campo
0 20 60 100 (N/mm²)
X
Y
I

DESENHO 8



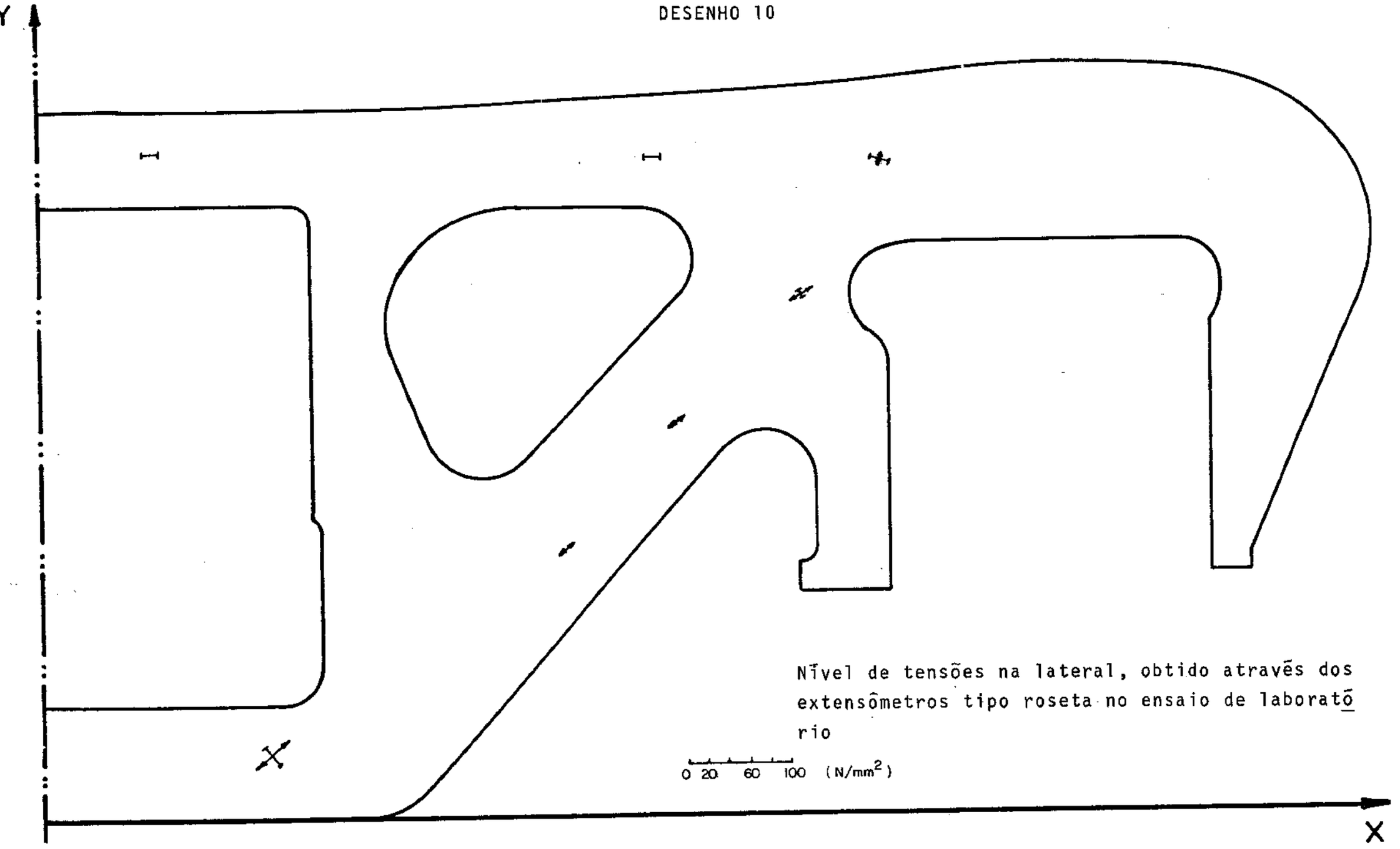
Distribuição dos extensômetros na lateral utilizada no ensaio de laboratório

DESENHO 9



Nível de tensões na lateral, obtido através dos extensômetros lineares no ensaio de laboratório

DESENHO 10



Nível de tensões na lateral, obtido através dos extensômetros tipo roseta no ensaio de laboratório

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ADAMS, D. - Experimental stress analysis and motion measurement. Nova Delhi, Pentice Hall of India, 1965.

[2] BERG, H. - Radsatzwelleverfahren. Alemanha Ocidental , Centro de Pesquisas de Minden, 1982.

[3] DUBBEL, H. - Manual del constructor de máquinas. Buenos Aires, Editorial Labor, 1977.

[4] HOFFMANN, K. - Fundamentals of strain gauge techniques ; the strain gauge, a universal tool of the experimental stress analysis. Darmstadt , Hottinger Baldwin Messtechnik , s.d.

[5] JACOBY, G. - Werkstoff und bauteilprü - fung sowie bertriebslasten - simulation. Darmstadt, Schenck , 1981.

[6] KRÖNING, J. - Untersuchungen mit einem finite - element - program an zwei kreuzstoßformen. Alemanha Ocidental, Universidade de Hamburgo, 1979.

[7] OLIVEIRA, A. C. C. - Ensaio estático da lateral de um truque ferroviário modelo Ride Control. Campinas, Centro de Tecnologia da UNICAMP, 1984.

[8] OLIVEIRA, A. C. C. - Ensaio estático da lateral de um truque ferroviário modelo Barber. Campinas, Centro de Tecnologia da UNICAMP, 1984.

[9] OLIVEIRA, A. C. C. - Ensaio estático de um truque ferroviário modelo Ride Control. Campinas, Centro de Tecnologia da UNICAMP, 1984.

[10] OLIVEIRA, A. C. C. - Ensaio estático de um truque ferroviário modelo Barber. Campinas, Centro de Tecnologia da UNICAMP, 1984.

[11] PORTO, A. A. G. - Contribuição ao procedimento de avaliação de truques ferroviários através do comportamento dinâmico na via. Campinas, Centro de Tecnologia da UNICAMP, 1986.

[12] SCHENK, H. - Prüfung und simulation im eisenbahnwesen. Alemanha Ocidental, Centro de Pesquisas de Minden,1984.

[13] SOUZA, S. A. - Ensaios mecânicos de materiais metálicos . São Paulo, Edgard Blücher, 1982.

[14] STRUCTURAL analysis program nº 4

SIMBOLOGIA

X - Eixo coordenado X do sistema carteziano

Y - Eixo coordenado Y do sistema carteziano

Z - Eixo coordenado Z do sistema carteziano

F_y - Força vertical de carregamento da lateral

i - Nó i da malha dos elementos finitos

j - Nó j da malha dos elementos finitos

k - Nó k da malha dos elementos finitos

ℓ - Nó ℓ da malha dos elementos finitos

σ - Tensão axial no estado simples

σ_1 - Tensão principal de maior valor absoluto no estado duplo

σ_2 - Tensão principal de menor valor absoluto no estado duplo

α - Ângulo da tensão principal σ_1 em relação ao eixo coordenado X

Ω - Resistência Ohmica dos extensômetros elétricos