

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Parecer

*Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Roberto Amaral Duarte e aprovada pela Comissão Julgadora em 13 de dezembro de 1985.
Campinas, 13 de dezembro de 1985*



Presidente da Banca

EQUAÇÕES EMPÍRICAS DE TENSÕES ESTRUTURAIS DE ARADOS
GERADAS PELO CÁLCULO ESTRUTURAL COMPUTADORIZADO

AUTOR: NORBERTO AMARAL DUARTE

ORIENTADOR: PROF. DR. OSCAR ANTONIO BRAUNBECK

TESE APRESENTADA À FACULDADE DE
ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCO-
LA, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS -UNICAMP- COMO PARTE DOS
REQUISITOS EXIGIDOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA.

À Maria de Lourdes,

que comigo percorreu este

longo e árduo caminho,

florindo-o com seu sorriso.

AGRADECIMENTOS...

... ao Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck pela orientação objetiva e segura, embasada em sábios ensinamentos e, acima de tudo, pela compreensão e amizade dispensadas ao longo dos últimos anos.

... as instituições de ensino que propiciaram as condições e forneceram os meios para a efetivação deste estudo.

... aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola que, devido a solidariedade, compreensão e amizade, tornaram possível ainda a consecução deste desiderato.

... ao Prof. Dr. Sebastião de Amorim, do IMECC-UNICAMP, pela orientação no desenvolvimento e análise estatística do experimento.

... aos Profs. Drs. Inácio Maria Dal Fabbro, José Luis Vasconcellos da Rocha, José Tadeu Jorge e Wesley Jorge Freire pela habitual atenção e colaboração dispensada.

... ao Eng. Ruy Casão Junior e família pelo estímulo, apoio e amizade.

... à minha mãe Lucília, sogra Marina, irmãos e demais familiares pelo irrestrito apoio e compreensão.

... ao meu saudoso pai, Felisberto, pelos exemplos que se me deu.

C O N T E Ú D O

| | PÁGINA |
|---|--------|
| ÍNDICE DE TABELAS | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE APÊNDICES | ix |
| SIMBOLOGIA | x |
| RESUMO | 1 |
| SUMMARY | 3 |
| 1. INTRODUÇÃO | 4 |
| 2. OBJETIVOS | 7 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 3.1 Geometria da secção | 9 |
| 3.2 Torção em tubos de paredes delgadas | 11 |
| 3.3 Reações do solo no disco do arado | 11 |
| 3.4 Largura de trabalho dos discos | 16 |
| 3.5 Distância entre os discos | 17 |
| 3.6 Altura da torre | 18 |
| 3.7 Cálculo estrutural | 21 |
| 3.8 Método de superfície de resposta | 22 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 23 |
| 4.1 Sistemas de eixos referenciais | 24 |
| 4.2 Microcomputador | 25 |
| 4.3 Elemento estrutural | 26 |
| 4.4 Registro de dados | 27 |
| 4.5 Gravação de dados | 27 |
| 4.6 Método da rigidez | 28 |

| | | |
|---------|--|----|
| | | 20 |
| 4.6.2 | Etapas do método da rigidez | 28 |
| 4.7 | Análise do pórtico espacial | 32 |
| 4.7.1 | Grau de indeterminação cinemática | 32 |
| 4.7.2 | Propriedades da estrutura | 33 |
| 4.7.3 | Matriz de rotação | 36 |
| 4.7.4 | Condições de restrições dos nós | 38 |
| 4.7.5 | Matriz de rigidez da estrutura | 42 |
| 4.7.6 | Inversão da matriz de rigidez | 45 |
| 4.7.7 | Cargas na estrutura | 46 |
| 4.7.7.1 | Cargas nodais | 46 |
| 4.7.7.2 | Cargas nas barras | 46 |
| 4.8 | Construção dos vetores associados às cargas | 48 |
| 4.8.1 | Cargas equivalentes | 48 |
| 4.8.2 | Cargas combinadas | 49 |
| 4.9 | Cálculo de ações nas extremidades das barras | 51 |
| 4.9.1 | Deslocamento de nó e reações de apoio | 51 |
| 4.9.2 | Ações nas extremidades das barras | 52 |
| 4.9.3 | Armazenamento das ações | 54 |
| 4.10 | Tensão máxima na barra | 55 |
| 4.11 | Geracão das equações empíricas | 62 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 63 |
| 5.1 | Condições de apoio | 63 |
| 5.2 | Pontos de tensão máxima | 68 |
| 5.3 | Modelos matemáticos | 69 |
| 6. | CONCLUSÕES | 78 |
| 7. | SUGESTÕES | 80 |
| 8. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| 9. | APÊNDICES | 85 |

ÍNDICE DE TABELAS

| TABELA | | PÁGINA |
|--------|---|--------|
| 3.6.1 | Dimensões padronizadas do engate de três pontos, categorias I e II. | 20 |
| 4.7.1 | Coordenadas dos nós da estrutura do arado. | 33 |
| 4.7.2 | Orientação das barras. | 35 |
| 4.7.3 | Dados de entrada relativos à estrutura e ao material considerado no projeto. | 35 |
| 4.7.4 | Condições de restrições para o arado em operação normal. | 39 |
| 4.7.5 | Condições de restrições para o arado operando sem roda guia, com as correntes estabilizadora direita tensionada e esquerda afrouxada. | 40 |
| 4.7.6 | Condições de restrições para o arado operando sem roda guia, com as correntes estabilizadora direita afrouxada e esquerda tensionada. | 41 |
| 4.9.1 | Dados de entrada relativos às cargas. | 54 |
| 4.10.1 | Variáveis da estrutura. | 56 |
| 4.10.2 | Valores que as variáveis da estrutura podem assumir. | 56 |
| 5.1.1 | Tensão máxima nas barras (N/cm ²) para as | |

| | | |
|-------|--|----|
| | três situações de apoio considerando as va- riáveis $A_1 = A_2 = A_4 = A_5 = 2$, $A_3 = 6$, $A_6 = 0,203$ $A_7 = 0,569$ (cm). | 65 |
| 5.1.2 | Tensão máxima nas barras (N/cm ²) para as três situações de apoio considerando as variáveis $A_1 = A_2 = 4$, $A_3 = 6$, $A_4 = 2$, $A_5 = 2$, $A_6 = 0,203$, $A_7 = 0,569$ (cm). | 65 |
| 5.1.3 | Tensão máxima nas barras (N/cm ²) para as três situações de apoio considerando $A_3 = 8$ $A_1 = A_2 = A_5 = 4$, $A_4 = 2$, $A_6 = 0,325$, $A_7 = 0,733$ (cm). | 66 |
| 5.1.4 | Tensão máxima nas barras (N/cm ²) para as três situações de apoios considerando $A_1 = 8$ $A_2 = A_5 = 2$, $A_3 = 8$, $A_4 = 4$, $A_6 = 0,325$, $A_7 = 0,733$ (cm) | 66 |
| 5.1.5 | Tensão máxima nas barras (N/cm ²) para as três situações de apoios considerando $A_1 = 1$ $A_2 = 2$, $A_3 = 4$, $A_4 = 3$, $A_5 = 2$, $A_6 = A_7 = 0,5$ (cm). | 67 |
| 5.1.6 | Tensão máxima nas barras (N/cm ²) para as três situações de apoios considerando $A_1 = 2$ $A_2 = A_4 = A_5 = 2$, $A_3 = 5$, $A_6 = 0,4$, $A_7 = 0,7$ (cm). | 67 |
| 5.3.1 | Parâmetros da equação de regressão para de- terminação das tensões máximas nas barras estruturais do arado de três discos. | 71 |
| 5.3.2 | Dados da avaliação estatística das equa- ções empíricas de tensão máxima (TMAX). | 72 |
| 5.3.3 | Parâmetros estimados para equação de re- gressão, modelo simplificado. | 76 |
| 5.3.4 | Dados da avaliação estatística das equações empíricas de tensão máxima (TMAX) _i , modelo simplificado. | 76 |

INDICE DE FIGURAS

| FIGURA | | PÁGINA |
|--------|--|--------|
| 3.1.1 | Secção transversal das barras da estrutura. | 10 |
| 3.3.1 | Forças exercidas pelo solo sobre o disco. | 13 |
| 3.3.2 | Coluna de sustentação do disco à estrutura do arado. | 13 |
| 3.3.3 | Esforços resultantes sobre os nós 4 e 5 da estrutura do arado devidas às reacções do solo. | 14 |
| 3.3.4 | Esforços resultantes sobre a barra 4 da estrutura do arado devidos às reacções do solo. | 15 |
| 3.5.1 | Distância t entre os discos do arado. | 18 |
| 3.6.1 | Dimensões padronizadas do engate de três pontos. | 19 |
| 4.1.1 | Estrutura portante do arado de três discos. | 24 |
| 4.1.2 | Vistas principais da estrutura espacial do arado. | 25 |
| 4.7.1 | Indexação da barra I. | 42 |
| 4.7.7 | Ações de engastamento na barra genérica I. | 47 |
| 4.9.1 | Numeração das ações nas extremidades da barra. | 51 |
| 4.10.1 | Centróide da metade da secção. | 57 |
| 4.10.2 | Pontos pesquisados na secção da barra. | 61 |
| 5.3.1 | Gráfico de tensões máximas na barra 2. | 73 |
| 5.3.2 | Gráfico de tensões máximas na barra 4. | 73 |

ÍNDICE DE APÊNDICES

| APÊNDICE | | PÁGINA |
|----------|--|--------|
| A | Programa de Análise de Pórticos Especiais | 85 |
| B | Subprograma Matriz de Rigidez | 106 |
| C | Subprograma Inverte Matriz | 107 |
| D | Subprograma Peso Próprio | 108 |
| E | Subprograma Ações nas Barras | 108 |
| F | Subprograma Guarda Ações | 109 |
| G | Subprograma LÊ Ações | 110 |
| H | Subprograma Guarda TMAX | 110 |
| I | Subprograma Varia Secção | 111 |
| J | Subprograma Tensão Máxima | 112 |
| L | Matriz de Rigidez de Barra de Pórtico Espacial | 114 |
| M | Diagrama de Blocos da Análise de Pórtico Espacial | 115 |
| N | Tabela de Ações de Engastamento | 117 |
| O | Banco de Dados das Variáveis e das Tensões Máximas da estrutura | 118 |

S I M B O L O G I A

| SÍMBOLO | DESCRIÇÃO | UNIDADE |
|------------|---|------------------|
| A | LARGURA EXTERNA DA SECCÃO TRANSVERSAL DA BARRA | m |
| A() | AÇÕES NOS NÓS | N |
| AA | IDENTIFICADOR PARA O ÂNGULO (ALFA) | - |
| AC() | CARGAS NODAIS COMBINADAS | N |
| AE() | CARGAS NODAIS EQUIVALENTES | N |
| AM() | AÇÕES NAS EXTREMIDADES DA BARRA | N |
| AR() | REAÇÕES NOS APOIOS | N |
| AX() | ÁREA DA SECCÃO TRANSVERSAL DA BARRA | m ² |
| AML() | AÇÕES NAS EXTREMIDADES DA BARRA RESTRINGIDA | N |
| B | ALTURA EXTERNA DA SECCÃO TRANSVERSAL DA BARRA | m |
| C | LARGURA INTERNA DA SECCÃO TRANSVERSAL DA BARRA | m |
| C() | IDENTIFICADOR PARA ARMAZENAMENTO TEMPORÁRIO DA TENSÃO MÁXIMA | N/m ² |
| CX, CY, CZ | COSSENOS DIRETORES DA BARRA | - |
| CRL() | LISTA DE RESTRIÇÕES CUMULATIVAS | - |
| D | ALTURA INTERNA DA SECCÃO TRANSVERSAL DA BARRA | m |
| D() | DESLOCAMENTO DE NÓ DESCONHECIDO | m |
| E | MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL | N/m ² |
| E1 A E6 | IDENTIFICADOR PARA ARMAZENAMENTO TEMPORÁRIO DAS AÇÕES AM | - |

| | | |
|-------------------|---|------------------|
| G | MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL | N/m ² |
| I | ÍNDICE DE BARRA | — |
| IX() | CONSTANTE DE TORÇÃO | m ⁴ |
| IY(), IZ() | MOMENTO DE INÉRCIA DA SECCÃO | m ⁴ |
| J | ÍNDICE DE NÓ | — |
| JJ() | DESIGNAÇÃO DA EXTREMIDADE ESQUERDA DA BARRA | — |
| JK() | DESIGNAÇÃO DA EXTREMIDADE DIREITA DA BARRA | — |
| K | ÍNDICE DE NÓ | — |
| L() | COMPRIMENTO DA BARRA | m |
| M | NÚMERO DE BARRAS | — |
| MD(,) | MATRIZ DE RIGIDEZ DA BARRA | — |
| MR | IDENTIFICADOR PARA ARMAZENAMENTO TEMPORÁRIO DO PRODUTO SM x RT | — |
| M _{sx} : | MOMENTO ESTÁTICO DA ÁREA EM RELAÇÃO AO EIXO X | N.m |
| MX, MY, MZ | MOMENTO NA BARRA | N.m |
| MXd, MYd, MZd | MOMENTO NO DISCO | N.m |
| N | NÚMERO DE GRAUS DE LIBERDADE | — |
| NJ | NÚMERO DE NÓS | — |
| NLJ | NÚMERO DE NÓS COM CARGA | — |
| NLM | NÚMERO DE BARRAS COM CARGA | — |
| NR | NÚMERO DE RESTRIÇÕES DE APOIO | — |
| R | MATRIZ DE ROTAÇÃO | — |
| RJ | NÚMERO DE NÓS RESTRINGIDOS | — |
| RL() | LISTA DE RESTRIÇÃO DE NÓ | — |
| RX, RY, RZ | REAÇÕES NA BARRA | N |
| RXd, RYd, RZd | REAÇÕES NO DISCO NAS DIRECÇÕES DOS EIXOS DA DA ESTRUTURA | — |

| | | |
|-------------|--|------------------|
| S(,) | MATRIZ DE RIGIDEZ DE NÓ (Sj) | -- |
| SM(,) | MATRIZ DE RIGIDEZ DA BARRA | -- |
| TM() | IDENTIFICADOR PARA ARMAZENAMENTO, DE TENSÃO | -- |
| TMAX | TENSÃO MÁXIMA NA BARRA | N/m ² |
| TY | TENSÃO DE CISALHAMENTO | N/m ² |
| TX | TENSÃO DE TRACÇÃO OU COMPRESSÃO | N/m ² |
| W | VOLUME DE MATERIAL NA BARRA | m ³ |
| X(),Y(),Z() | COORDENADAS DO NÓ | m |
| XCL,YCL,ZCL | COMPONENTES DO COMPRIMENTO DA BARRA | m |
| XM, YM,ZM | EIXOS REFERENCIAIS DA BARRA | -- |
| XP,YP,ZP | COORDENADAS X,Y E Z DO PONTO p | m |
| XPS,YPS,ZPS | COORDENADAS X _s ,Y _s E Z _s DO PONTO p | m |
| YG, ZG | COORDENADAS DO CENTRÓIDE | m |
| YM, ZM | MOMENTO FLETOR | N.m |
| YPG,ZPG | COORDENADAS Y _y E Z _y DO PONTO p | -- |

RESUMO

Adotou-se, para o desenvolvimento do presente trabalho, a estrutura portante de um arado de três discos, montado no sistema de engate hidráulico em três pontos de um trator agrícola. As seções transversais das barras são retangulares vazadas e de perfis leves dobrados à frio.

Foram implementados programas de cálculo estrutural visando a determinação das ações nas extremidades das barras de pórticos espaciais, usando o método da rigidez para análise de estruturas reticulares e subprogramas para o cálculo das tensões máximas nas barras, para microcomputadores digitais a partir de 48 kilobytes de memória randômica.

Através de testes previamente realizados, concluiu-se que, quando a roda guia do arado perde sustentação lateral, provoca o tensionamento da corrente estabilizadora esquerda dos braços inferiores do engate de três pontos, gerando acréscimo generalizado de tensões na estrutura. Portanto, esta foi a condição de apoio adotada na análise da estrutura.

Estabeleceu-se, por regressão múltipla, equações de tensões estruturais máximas para as barras do arado, em função da largura e espessura da seção, podendo estas variáveis assumir três níveis de valores.

As equações geradas para facilitar o acesso ao cálculo estrutural pelo projetista de pequenas e médias empresas, podem ser resolvidas com o uso de calculadoras portáteis simples. Além disto, os programas montados para a pesquisa, podem ser usados, também, para a análise de estruturas de quaisquer outras máquinas cuja estrutura seja reticulada e na concepção de novas máquinas com estruturas não convencionais.

S U M M A R Y

A mounted moldboard plow was used to develop the proposed stress analysis methodology. Rectangular cross sectional bars of light gage cold formed steel were considered for the study.

A structural analysis computer program was written to calculate actions at the end of bars of a space frame, using the stiffness method. Subroutines were written to calculate maximum stresses in bars. All work was done in a microcomputer with 48 kbites of rondon memory.

Some preliminary stress analysis indicated that the lack of lateral support for the rear furrow wheel of the plow develops a generalized stress increase all over the structure, as the left stabilizing chain of the three point hitch is tightened. This unfavorable support condition was considered for the analysis.

Multiple regression equations for maximum equivalent stress in each bar were obtained from data generated by conventional structural analysis.

Thickness of light gage steel and width of box type bars are the independent variables of the regression equations. The regression stress equations can be solved in conventional hand calculators. It allows better and quicker structural design for small manufacturers with no computer facilities.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de qualquer novo produto de uma fábrica de máquinas agrícolas requer o projeto com plantas geral e de detalhe dos componentes orgânicos do engenho, além do dimensionamento da estrutura, portante, encarregada de suportar a combinação de tensões devidas a seus diversos conjuntos de órgãos e de manter suas posições relativas. A tolerância das medidas que estabelecem este posicionamento relativo depende das funções a que se destinam estes órgãos, sendo possível que deformações de poucos milímetros inviabilizem o aproveitamento de um conjunto de órgãos para uma máquina, especialmente se houver movimento relativo entre as partes. Todavia, deformações maiores, certamente, podem ser insignificantes ao desempenho de outras máquinas.

No entanto, o tratamento analítico clássico empregado para determinação de esforços e deformações em estruturas espaciais, hiperestáticas, através das equações convencionais da estática e da elasticidade, resultam extremamente complexas para serem utilizadas pelo projetista de máquinas das pequenas e médias empresas, dado a necessidade de computador para armazenamento e processamento dos dados, devido ao tamanho das matrizes envolvidas no processo. Fato este que, por si só, constitui-se em forte entrave ao projeto.

Tornou-se, pois, prática usual estabelecer o dimensionamento da estrutura por sucessivas simplificações da estrutura real até ser possível lançar mão das simples fórmulas de vigas ou práticos planos isostáticos, conduzindo a resultados caracterizados por uma larga margem de incerteza, forçando o projetista a considerar grandes coeficientes de segurança, superdimensionando a estrutura; em função disto, torna-se imperiosa a construção de protótipos para ensaio de campo, onde a observação aliada à intuição aferida ao longo de anos de experiência, determinam as modificações a serem implementadas para corrigir as deficiências, decorrentes dos erros acumulados no projeto.

Este procedimento, acarreta prejuízos à empresa que não vê como evitá-lo, pois concentra seus esforços em aperfeiçoar as características funcionais, dispensando atenções à estrutura somente na medida em que ela possa melhorar os parâmetros de eficiência operacional. Entretanto, existem outros fatores relevantes a serem considerados, sob pena do cometimento de sérios prejuízos técnicos e econômicos. É, pois, de domínio público que o uso de máquinas cujo peso não se faz necessário à melhoria da sua capacidade tração ou de penetração, deverá ser reduzido na medida do possível para evitar compactação do solo agrícola ou, no caso de implementos portados, aumentar o seu tamanho sem prejudicar o equilíbrio do conjunto trator-implemento, além da sempre desejada economia de combustível originada pela diminuição da resistência ao rolamento.

O fato do peso total da máquina ser um fator preponderante no estabelecimento do preço ao consumidor é prova incontestável

da inexistência de dimensionamento tecnicamente criterioso da estrutura portante da máquina.

A análise de estruturas reticuladas convencionais de máquinas agrícolas, como grades, arados, semeadoras, colheitadoras e outras, permite o conhecimento preciso da distribuição de esforços em cada barra do conjunto, considerando as cargas específicas em função do trabalho a que se destina e das condições ambientais do local de operação permitindo, inclusive, que se estimule o desenvolvimento de máquinas de configuração não convencional.

Os dados de solicitação mecânica de máquinas agrícolas estão disponíveis nas muitas pesquisas publicadas, cada qual abordando as diversas variáveis do problema, não raro correlacionando tipo de máquina, condições do solo e parâmetros de operação.

Neste trabalho estudou-se um método simplificado para o dimensionamento de pórticos espaciais, em particular, de arados de três discos, através do estabelecimento de equações de tensões máximas nas barras da estrutura em função da largura e espessura da secção transversal, obtidas por regressão múltipla, podendo ser resolvidas usando uma calculadora portátil.

O manejo destas equações por projetistas que trabalham em fábricas de máquinas agrícolas, lhes ensinará um dimensionamento rápido e preciso, levando ao uso racional do material e conservando dentro de limites criteriosos os níveis de segurança necessários, considerando a variabilidade das cargas aplicadas ou a incerteza dos dados de carregamento disponíveis.

CAPÍTULO 2

2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho consiste em tornar mais acessível o método de análise de estruturas espaciais, que por sua complexidade e exigência, torna-se limitante ao projetista, mormente de pequenas e médias fábricas de máquinas, inviabilizando o dimensionamento mais criterioso das máquinas agrícolas. A consumação deste desiderato tornou-se possível devido às seguintes etapas:

- 2.1 - Implementar programas, em linguagem Basic, para microcomputadores digitais que permitam calcular as ações (AM) nas extremidades das barras, usando o Método da Rigidez para análise de estruturas reticulares.
- 2.2 - Adotar uma máquina de configuração estrutural tipicamente definida, estabelecer as variáveis estruturais que a caracterizam geometricamente e gerar um banco de dados das ações nos extremos das barras através do programa desenvolvido na etapa 2.1.
- 2.3 - Desenvolver e implementar um programa para microcomputador digital, em linguagem Basic, que propicie a determinação, a

partir do banco de dados criado na etapa 2.2, das equações de tensões estruturais máximas.

2.4 - Verificar, otimizar e propor as equações geradas que permitam determinar as tensões máximas nas barras em função das variáveis geométricas da estrutura. Os parâmetros otimizados das equações serão gerados através de programa próprio para estimação de parâmetros em computador digital.

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No que concerne a cálculo estrutural de máquinas agrícolas a literatura científica é extremamente rara e muito limitada.

SERGEI IING [22], em 1975, desenvolveu alguns trabalhos em mecânica dos sólidos e estruturas usando o método numérico de Elementos Finitos, aplicados principalmente ao estudo da distribuição de tensões em chapas e peças de geometria irregular.

BEER & JOHNSTON [4], TIMOSHENKO & GODIER [24] e WILLEMS et alii [29] suprem os conhecimentos necessários para o dimensionamento de componentes estruturais, fornecendo as bases para o estudo da distribuição de tensões e mesmo para a determinação das tensões estruturais máximas, mas assumindo como conhecidos os valores dos esforços aplicados nas barras. Esta condição é fator limitante ao dimensionamento pois, geralmente, requer para estruturas espaciais a solução de sistemas de elevado grau de hiperestaticidade.

3.1 Geometria da Secção

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas [1] em seu R-NB-143, dispensa-se a verificação da segurança à flambagem

lateral em barras com secção retangular vazada (figura 3.1.1) desde que a relação da distância entre os pontos de apoio lateral da barra para a distância entre as almas exceda de 75.

RICARDO [19] considera importante ponderar nos projetos que a secção aberta é muito menos rígida que a secção fechada correspondente e que na presença de torção, como nos arados, deve haver preferência definida para as secções fechadas. Por isto, adotou-se neste trabalho a secção apresentada na Figura 3.1.1.

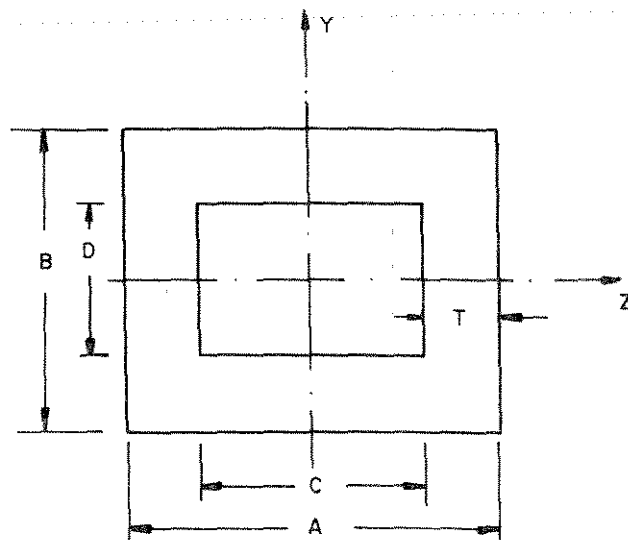


Figura 3.1.1 - Secção transversal das barras da estrutura.

O uso de chapas planas de aço, segundo WALKER [27], devidamente formatadas à frio, em secções que atendam as estrita exigências do projeto, é um passo importante na senda evolutiva da engenharia estrutural. O acréscimo na relação tensão admissível pelo peso do perfil não é a única vantagem em usar perfis de chapas dobradas à frio; segundo aquele autor, a esta somam-se as vantagens de disponibilidade imediata, menor custo, facilidade de

transporte e de manuseio. Desta forma os requerimentos de resistência e de funcionalidade podem ser especialmente atendidos para cada aplicação particular.

3.2 Torção em Tubos de Paredes Delgadas

De acordo com TIMOSHENKO & GODIER [24], uma solução aproximada do problema de torção de tubos de paredes delgadas (δ) pode ser facilmente obtida pela utilização da analogia da membrana, de onde obtém-se:

$$\theta = M_t / 2 \times A_P \times T \quad (3.1)$$

em que A_P representa a média das áreas delimitadas pelos contornos externos e internos da secção transversal do tubo, com espessura T e submetida a um momento torsor M_t .

3.3 Reações do Solo no Disco do Arado

Para BAINER et alii [2] e RICKEY et alii [20], as principais forças verticais que atuam no arado são devidas ao seu peso próprio, à pressão descendente exercida durante a elevação do solo ao longo do disco para o volteio e posterior tombamento, e a uma componente ascendente devida ao engate situado acima do ponto de resistência.

As componentes transversais devidas à fricção do solo sobre o disco, ao translado da terra lateralmente à largura do sulco e ao efeito de corte, são as principais forças horizontais transversais.

Atuando longitudinalmente ao curso do arado, sobressaem as componentes de resistência do solo frente à ação de corte pela borda externa do disco e do atrito do solo sobre o disco.

REED [18] listou os seguintes valores por unidade de tração para discos de 660 mm de diâmetro, operando a uma velocidade de 5,6 km/h, presumivelmente baseado em testes realizados no USDA Tillage Machinery Laboratory:

Solo Arenoso - 1,9 - 3,0 psi

Solo Argilo-arenoso - 6,0 - 8,5 psi.....

Solo Argiloso - 9,0 - 11,3 psi

RICKEY et alii [20], afirmaram que a velocidade de deslocamento, é um importante fator no acréscimo das forças lateral e vertical porque afeta na distância de arremesso lateral da leiva e, conseqüentemente, no seu fracionamento. Todavia, com o aumento da inclinação vertical do disco, sua capacidade de penetração é diminuída com o acréscimo de velocidade.

GORDON [13] estudou, em laboratório, a dinâmica do disco utilizando dois solos de diferentes texturas. Nos ensaios conduzidos variaram as profundidades, os ângulos de regulagens, a geometria dos discos e as velocidades, tendo o autor concluído que o fator velocidade exerce uma influência significativa no aumento da componente longitudinal. Para o caso de um solo argilo-arenoso SOUZA et alii [23] verificaram que o valor da força de tração de um disco aumenta 67 % quando a velocidade de deslocamento aumenta de 4 para 8 km/h.

As forças no disco se relacionam a um sistema de coordenadas do disco X_d, Y_d, Z_d , onde R_X, R_Y, R_Z são as forças e M_X, M_Y e M_Z , os momentos. CLYDE [10] determinou as seguintes reações em solo argilo-siltoso, trabalhando a profundidade de 20 cm, largura de corte de 18 cm, velocidade de deslocamento de 4,8 km/h, ângulo de corte de 40 graus e ângulo vertical de 18 graus (Figura 3.3.1)

$$R_X = 2040 \text{ N}$$

$$R_Y = -610 \text{ N}$$

$$R_Z = 1000 \text{ N}$$

$$M_X = 33,34 \text{ N.m}$$

$$M_Y = 193,04 \text{ N.m}$$

$$M_Z = 357,20 \text{ N.m}$$

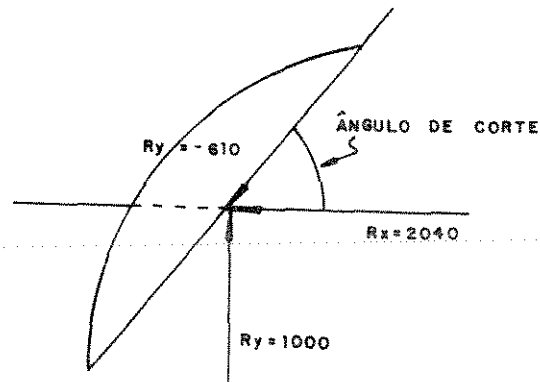


Fig. 3.3.1 - Forças exercidas pelo solo sobre o disco do arado.

Usando-se um disco de 660 mm e trabalhando-se com uma folga de 120 mm para facilitar o tombamento da leiva sem roçar o chassi do arado, ter-se-á o braço da coluna de sustentação do disco com 450 mm (Figura 3.3.2).

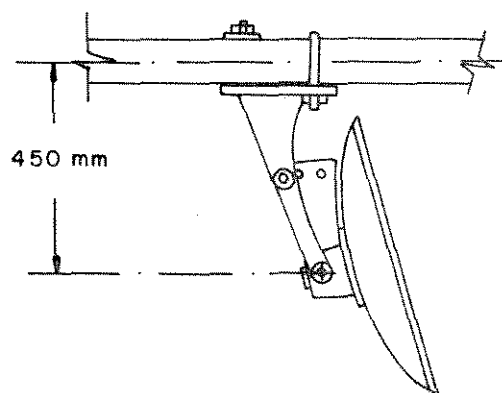


Fig. 3.3.2 - Coluna de sustentação do disco à estrutura do arado.

Considerando-se a altura da coluna de sustentação do disco, os esforços resultantes sobre a estrutura são:

- nos nós, em relação às coordenadas da estrutura (Figura 3.3.3)

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| $R_X = 2040 \text{ N}$ | $M_X = -416,70 \text{ N.m}$ |
| $R_Y = -610 \text{ N}$ | $M_Y = 193,00 \text{ N.m}$ |
| $R_Z = 1000 \text{ N}$ | $M_Z = 1275,20 \text{ N.m}$ |

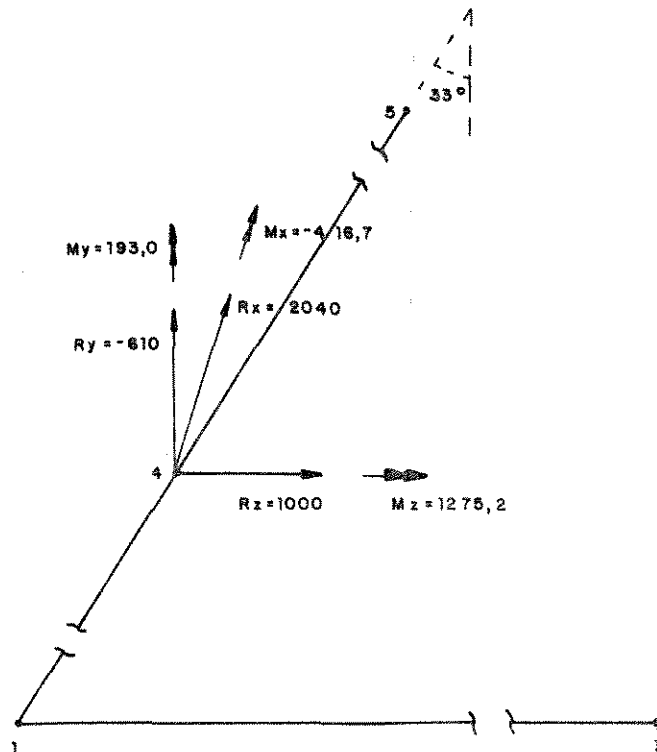


Figura 3.3.3 - Esforços resultantes sobre os nós 4 e 5 da estrutura do arado devidos às reações do solo.

- nas barras, em relação aos eixos da barra (Figura 3.3.4).

$$R_X = 1710 \text{ N}$$

$$R_Y = -610 \text{ N}$$

$$R_Z = 840 \text{ N}$$

$$M_X = -340,45 \text{ N.m}$$

$$M_Y = 193,00 \text{ N.m}$$

$$M_Z = 1066,40 \text{ N.m}$$

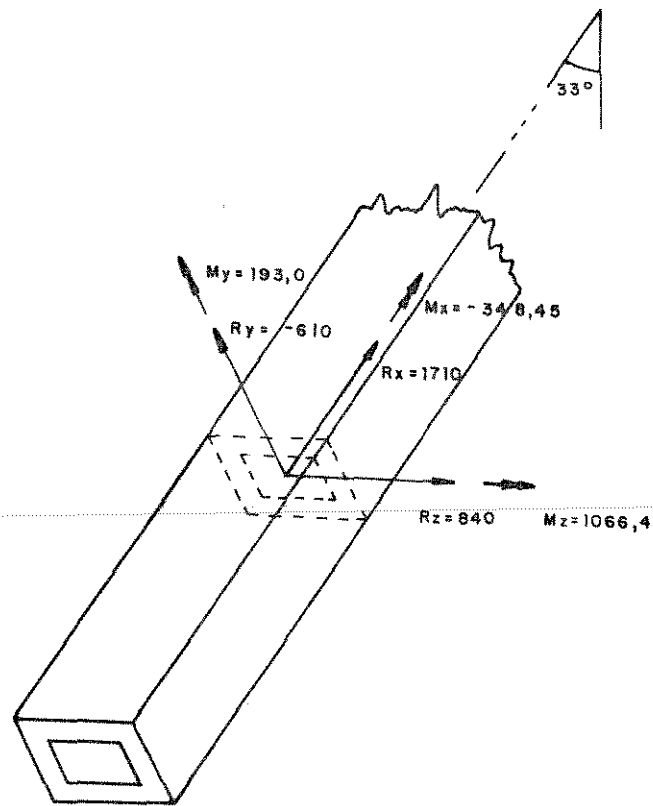


Figura 3.3.4 - Esforços resultantes sobre a barra 4 da estrutura do arado devidos às reações do solo.

Como cada conjunto que compõe o conjunto formado pelo disco, mancal e coluna pesa 400 N tem-se, então, os seguintes esforços resultantes:

- nos nós 9 e 5, em relação as coordenadas da estrutura;

$$R_X = 2040 \text{ N}$$

$$M_X = 33,34 \text{ N.m}$$

$$R_Y = -1010 \text{ N}$$

$$M_Y = 193,04 \text{ N.m}$$

$$R_Z = 1000 \text{ N}$$

$$M_Z = 357,20 \text{ N.m}$$

- na barra 4, em relação as coordenadas da barra;

| | |
|------------|-----------------|
| RX= 1710 N | MX= -348,45 N.m |
| RY=-1010 N | MY= 193,00 N.m |
| RZ= 890 N | MZ= 1066,40 N.m |

Os testes de GORDON [13] com discos de arado de 660 mm de diâmetro, apuraram que as forças de tração são menores para profundidades de 155 mm, concluindo que a profundidade ideal, para discos convencionais, situa-se próxima a 1/4 do diâmetro.

3.4 Largura de Trabalho dos Discos

Segundo BERNACK et alii [6] e CANAVATE [8], a largura de corte correspondente a cada disco oscila em função do ângulo formado entre o plano do disco e a direção de deslocamento, do ângulo de corte, da profundidade de corte e do diâmetro do disco. Para disco de 660 mm, aquela largura situa-se entre 180 e 300 mm.

Se Y o ângulo, medido no centro do disco, que abarca a superfície de trabalho, definida por um segmento circular, resulta a equação:

$$S = D^2 / 8 * (3.14Y / 180 - \text{SEN } Y) \quad (3.2)$$

onde S é a superfície do segmento do disco que efetivamente trabalha.

No caso, a profundidade máxima de trabalho (P) é definida pela equação:

$$P = D / 2.5 \times \cos \gamma \quad (3.3)$$

a partir da qual, também, pode-se calcular a superfície de trabalho S pela equação:

$$S = 0,3 \times D^2 \quad (3.4)$$

3.5 Distância entre os Discos

Em um arado de discos múltiplos, segundo BERNACK et alii [6] e CANAVATE [8], a distância (t) entre dois discos sucessivos deve ser calculada para que os discos não cheguem a ser travados pela leira. O espaçamento t, perpendicular aos discos, depende da profundidade de corte (a) ou da altura da crista do sulco (c). Em função da segunda dependência tem-se:

$$Dc \times \sin \theta = t \times \cos \theta \quad (3.5)$$

da equação (3.5) conclui-se que,

$$Dc = 2V \times c \times (D - c) \quad (3.6)$$

resultando na equação,

$$t = 2V \times c \times (D - c) \operatorname{tg} \theta \quad (3.7)$$

Para arados, o valor de c deve ser maior ou igual a $0,3 a_0$.

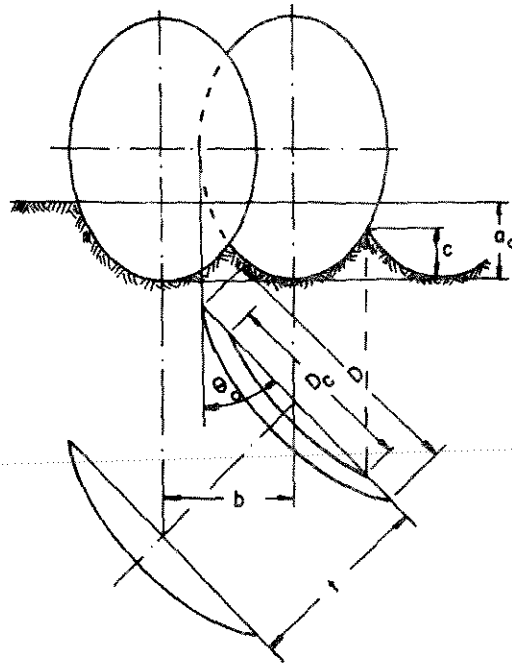


Figura 3.5.1 - Distância t entre os discos do arado.

3.4 Altura da Torre

A altura da torre (H) no arado é, de acordo com BARDER et alii [3], um dos fatores essenciais no estabelecimento do ponto de engate virtual do sistema de braços livres, no sensor da tração para o sistema sensível à tração, nas cargas sobre a articulação e pontos de engate, nas variações da inclinação do implemento correspondentes às variações na profundidade de trabalho, nas variações da inclinação do implemento quando este se acha na posição de transporte, no voo do implemento em relação ao trator

especialmente na posição de transporte e, nesta posição, no vão dos braços em relação ao implemento ou ao trator.

Alguns tratores da categoria II são projetados para admitir uma altura de torre de 560 mm como a ideal para o melhor desempenho.

Em 1969, a ABNT publicou o projeto de norma P-PB-84, que estabelece as dimensões padronizadas do sistema de engate e acoplamento, para as categorias I e II, conforme as cotas indicadas na Figura 3.6.1 e os valores sumarizados na Tabela 3.6.1 e expressos em milímetros.

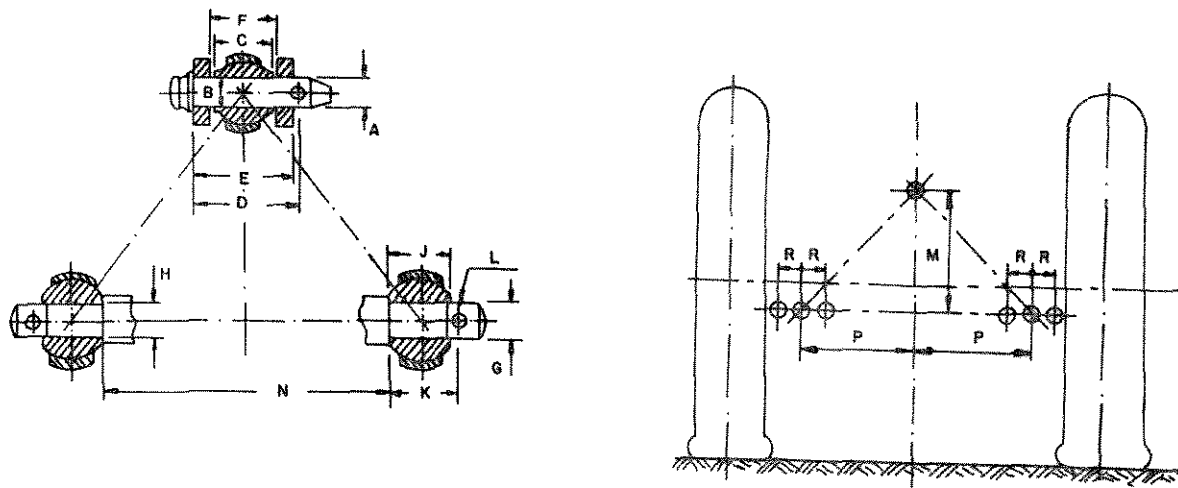


Figura 3.6.1 Dimensões padronizadas do engate de três pontos.

| Cotas | Designações | Categ. I | | Categ. II | |
|-------|---|----------|-------|-----------|-------|
| A | diam. dos pinos de engate | 18,9 | 19,0 | 25,3 | 25,4 |
| B | diam. dos furos p/ os pinos | 19,3 | 19,5 | 25,7 | 25,9 |
| C | largura da rótula | - | 44,0 | - | 51,0 |
| D | distância do furo do pino | 76,0 | - | 93,0 | - |
| E | " entre faces ext. da torre | - | 69,0 | - | 86,0 |
| F | " entre faces int. da torre | 45,5 | - | 52,0 | - |
| G | diam. dos pontos de engate | 21,8 | 22,0 | 27,8 | 28,0 |
| H | diam. dos orifícios p/ os pinos | 22,4 | 22,7 | 28,7 | 29,0 |
| J | largura da rótula | 34,8 | 35,0 | 44,8 | 45,0 |
| K | distância dos furos dos pinos | 39,0 | - | 49,0 | - |
| L | diam. do furo comum p/ os pinos de eng. superiores e inferiores | 11,7 | 12,2 | 11,7 | 12,2 |
| M | altura da torre | 460,0 | - | 460,0 | - |
| N | distância entre os ressaltos de apoio dos pto. de eng. infer. | 583,0 | - | 825,0 | - |
| P | distância do ponto de engate in- ferior ao plano médio do trator | 359,0 | - | 435,0 | - |
| R | deslocamento lateral dos pontos de engate inferiores | 100,0 | - | 125,0 | - |
| S | raio de ação esférico ao redor de cada ponto de engate | - | 45,0 | - | 67,0 |
| T | distância do extremo da TDP ao centro dos pto. de eng. infer. | 500,0 | 575,0 | 500,0 | 575,0 |
| X | distância entre implem. e trator | 63,5 | - | 73,2 | - |

Tabela 3.3.1 - Dimensões padronizadas do engate de três pontos.

3.7 Cálculo Estrutural

GERE & WEAVER [12] ponderam que um dos objetivos de qualquer análise estrutural é determinar várias ações pertencentes à estrutura, como as reações nos apoios e os esforços internos resultantes e que uma solução correta para quaisquer destas qualidades deve satisfazer todas as condições de equilíbrio estático, não só para toda a estrutura, como também para qualquer parte dela tomada como um corpo livre. Além do que, é indispensável que sejam satisfeitas todas as condições de compatibilidade.

Uma ação é mais comumente uma simples força ou um binário, mas também pode ser uma combinação de forças e binários, uma carga distribuída ou uma combinação destas ações. Além das ações externas à estrutura, é necessário considerar também as ações internas, que são as resultantes das distribuições de tensões internas e incluem momentos fletores e torsores, forças cortantes e forças axiais. Os deslocamentos de "nós" que, geralmente, referem-se a uma translação ou rotação em algum ponto da estrutura, tem um papel preponderante na análise de estruturas reticulares.

Quando uma estrutura está solicitada por um carregamento, suas barras sofrem deformações e, como consequência, pontos dentro da estrutura deslocam-se para novas posições. No geral, todos os pontos da estrutura, exceto os pontos de apoio fixos, sofrerão deslocamentos. As deformações podem ser analisadas tomando-se separadamente cada resultante do esforço e determinando seu efeito sobre um elemento da barra, tomado entre duas secções transversais

separadas entre si de uma pequena distância(dx). Em qualquer seção da barra haverá resultantes de esforços que, em pórticos espaciais, consistem de três forças e três binários, conforme ilustrado na Figura 4.9.1.

3.8 Método de Superfície de Resposta

BOX et alii [73] afirmam que o método de superfície de resposta tem sido largamente usado desde antes de 1950, para as mais variadas aplicações estatísticas, como por exemplo, engenharia agrícola, química e mecânica, que HILL & HUNTER, em 1966, e MEAD & PIKE, em 1975, fizeram uso deste método em muitos trabalhos e que MEYER, em 1963, empregou o em psicologia.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento alcançado na área da informática popularizou o uso de computadores digitais, ensejando uma reorganização da teoria estrutural sob a forma matricial, tornando possível um tratamento unificado para estruturas de todos os tipos. Dos métodos propostos, o da rigidez é o mais usado, por ser sistematizado e não exigir encaminhamento subjetivo permitindo, portanto, o emprego de computador.

Por representar uma grande fatia do parque fabril de máquinas agrícolas, o presente estudo foi desenvolvido baseado na estrutura típica do arado de três discos, portado no sistema de engate em três pontos de um trator agrícola, considerando que sua configuração espacial está suficientemente definida ou quase padronizada, de forma que seus componentes (barras) de maior responsabilidade na transferência de cargas do implemento ao solo ou ao sistema de engate, podem ser orientados espacialmente sem maiores ambiguidades (Figura 4.1.1).

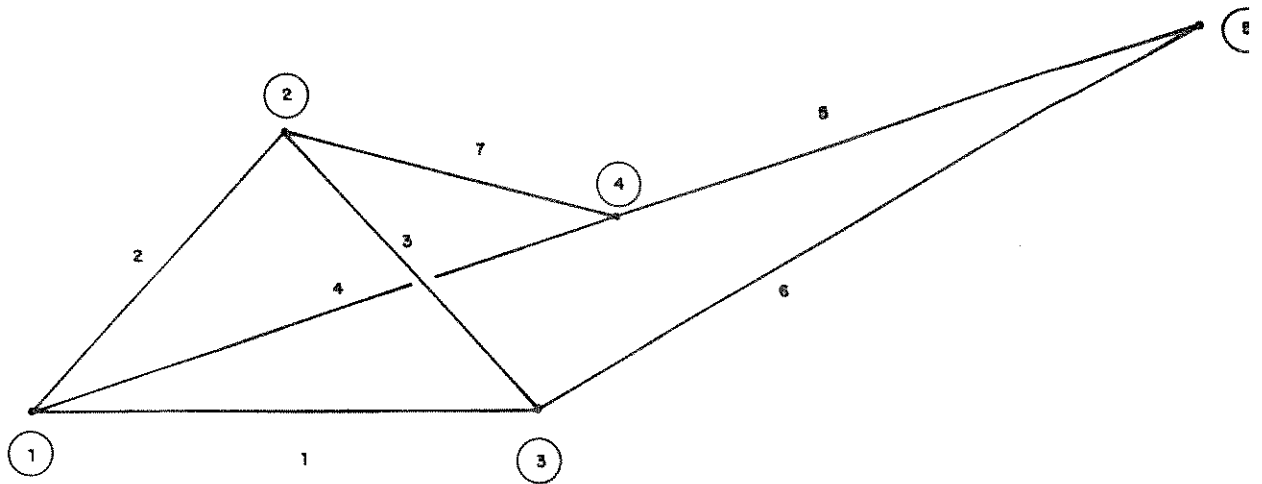
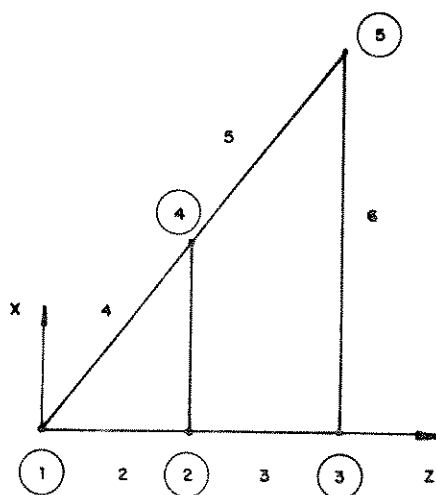


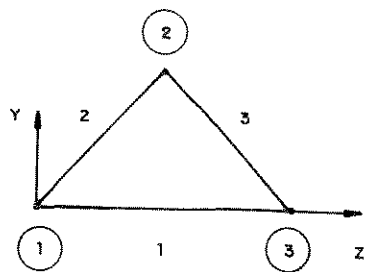
Figura 4.1.1 - Estrutura portante do arado de três discos.

4.1 Sistemas de Eixos Referenciais

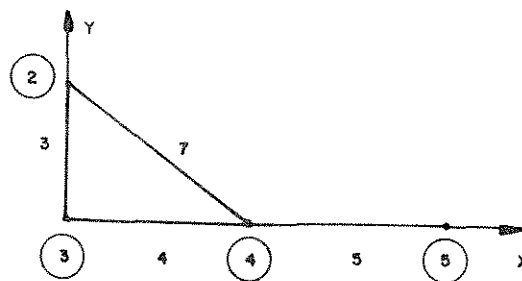
Os sistemas de referências são indispensáveis na análise estrutural para definir ações, deslocamentos e relações ações-deslocamentos em termos de dois conjuntos de eixos ordenados ortogonalmente. O primeiro conjunto é o da estrutura e consiste em um sistema de coordenadas simples, X_s , Y_s e Z_s (Figura 4.1.2). O segundo conjunto é o das barras e consiste em um sistema de coordenadas para cada barra.



a) Vista superior



b) Vista frontal



c) Vista lateral

Figura 4.1.2 - Vistas principais da estrutura espacial do arado.

Tendo-se em consideração que os resultados de qualquer análise estrutural, como as ações, os deslocamentos e as reações, precisam ser expressos em relação às respectivas coordenadas da barra, para permitir seu posterior dimensionamento, verifica-se que o maior problema na análise de qualquer tipo de estrutura, da viga ao pórtico espacial, é a transferência de informações entre o sistema de coordenadas da estrutura e os sistemas de coordenadas das barras que a constituem. Nos pórticos espaciais esta transferência é consumada pelo emprego de matrizes de rotação R através dos cossenos diretores CX , CY e CZ .

4.2 Microcomputador

O tamanho das matrizes envolvidas no cálculo requer o uso de computador para armazenamento e processamento dos conjuntos de dados. Dois microcomputadores, com diferenciações na linguagem Basic residente, ambos com 48 Kbytes de memória central para leitura e escrita (RAM) foram utilizados para elaboração dos dados

necessários ao desenvolvimento das equações de tensões máximas.

Foram desenvolvidos, com este propósito, programas genéricos para pórticos espaciais reticulares que, também, podem ser usados para quaisquer dos demais cinco tipos de estruturas reticulares, a saber, vigas, grelhas, treliças planas e espaciais e pórticos planos.

O programa, listado no Apêndice A, e os subprogramas, listados nos Apêndices B a J, traduzidos para a linguagem Basic, podem ser processados por microcomputadores Apple e compatíveis; com pequenas alterações também servem aos microcomputadores TRS e compatíveis. Não foram agregados a esta publicação, o programa e os subprogramas desenvolvidos para os micro da família TRS por serem resultantes de simples adaptações dos primeiros, para atenderem ao "hardware" do equipamento supracitado.

4.3 Elemento Estrutural

Como elemento estrutural foram consideradas barras de chapa de aço dobrada, devido ao baixo custo relativo e a possibilidade de dispor de seções compatíveis com a necessidade decorrente do cálculo, evitando a dependência dos perfis laminado disponíveis no mercado que, além de mais caros, levam à inviabilidade da consumação precisa do projeto.

As principais propriedades mecânicas das chapas de aço usadas no projeto são:

Módulo de elasticidade longitudinal (E) = $2,1 \times 10^{11}$ N/m²

Módulo de elasticidade transversal (G) = $8,05 \times 10^{10}$ N/m²

Peso específico (PE) = $7,8 \times 10^4$ N/m²

4.4 Registro de Dados

Os dados transitórios foram registrados em monitor de TV, enquanto que os resultados definitivos foram registrados em papel apropriado de 80 colunas, por uma impressora Mônica EI6010.

4.5 Gravação de Dados

Os programas e as informações deles decorrentes foram gravados em disquetes ("floppy-disk"), de 5 1/4" com capacidade de 496 setores e cada setor podendo armazenar até 256 bytes de informação.

O emprego de disquete como meio de gravação de informações, permite uma maior velocidade de acesso, mas requer o uso de unidade de disco ("drive-disk"), para acessar informações contidas no disquete.

Fazem parte da unidade de disco usada os itens relacionados abaixo:

- dois disk drive, simples face
- uma interface DII
- dois cabos plano, conectados aos disk drive
- três disquetes, dupla densidade

4.6 Método da Rigidez

Na formulação matemática do método da rigidez, as equações fundamentais são deduzidas utilizando o Princípio da Superposição de Efeitos, onde as incógnitas são os deslocamentos dos nós da estrutura.

4.6.1 Princípio da Superposição de Efeitos

O princípio da superposição de efeitos constitui-se em um dos mais importantes conceitos da análise estrutural e pode ser usado sempre que existam relações lineares entre as ações e os deslocamentos. Ele estabelece que os efeitos produzidos por várias causas podem ser obtidos combinando os efeitos devidos as causas individuais. Isto ocorre sempre que se satisfaça os seguintes requisitos:

- a- o material da estrutura obedeça à Lei de Hooke, ou seja, que o material seja perfeitamente elástico e, portanto, apresente relação linear entre o esforço e a deformação.
- b- os deslocamentos da estrutura sejam pequenos, propiciando a que todos cálculos envolvendo as dimensões totais da estrutura possam ser baseados nas suas dimensões originais.

4.6.2 Etapas do Método da Rigidez

O método da rigidez envolve o uso extensivo de ações e deslocamentos em barras com extremidades engastadas e por esta razão far-se-á uso do material apresentado no Apêndice N.

O método da rigidez, empregado na análise de uma estrutura é muito geral e pode ser aplicado à resolução de qualquer tipo de estrutura reticulada, consistindo nas seguintes etapas:

- a- Enunciar o problema descrevendo a estrutura, as cargas, variações de temperatura, deformações iniciais, e deslocamento de apoios. A descrição da estrutura inclui o tipo de estrutura, a localização dos nós, posições e dimensões das barras, localizações e tipos de apoios, além do material empregado.
- b- Restringir a estrutura através de engastamentos correspondentes ao número de graus de liberdade a fim de produzir a estrutura restringida, na qual todos os deslocamentos sejam zero. Existirá, sempre, uma única estrutura restringida possível e sua determinação é, portanto, óbvia.
- c- Análise da estrutura restringida submetida às cargas. Todas as cargas, exceto aquelas que correspondem a um deslocamento de nó desconhecido, são consideradas como aplicadas à estrutura fixa, sendo avaliadas as várias ações na estrutura. As ações ADI correspondentes aos deslocamentos são determinadas. As outras ações de interesse são as ações de extremidade AML para as barras e as reações ARL nos apoios. Todas estas ações podem ser encontradas com o auxílio das equações de ações de engastamento apresentadas no Apêndice N.

- d- Análise da estrutura restringida para outras causas. Se houverem variações de temperatura, pretensões ou deslocamentos de apoios a serem incluídos na análise, seus efeitos devem ser avaliados na estrutura restringida. As ações a serem encontradas são as que correspondem aos deslocamentos desconhecidos (ADT, ADP, ADR), as ações de extremidade de barra (AMT, AMP, AMR) e as reações (ART, ARP, ARR), as quais podem ser encontradas com a ajuda das equações supracitadas.
- e- Análise da estrutura restringida para valores unitários dos deslocamentos, onde são determinadas várias ações na estrutura restringida devidas a valores unitários dos deslocamentos de nó desconhecidos. As ações mais importantes a serem encontradas são as que correspondem aos deslocamentos desconhecidos (coeficientes de rigidez S). As outras a serem avaliadas são as ações na extremidade das barras e as reações nos apoios (AMD e ARD).
- f- Determinação de deslocamentos. A equação de superposição para as ações AD correspondentes aos deslocamentos na estrutura real tem a seguinte expressão:

$$AD = ADS + S \times D \quad (4.1)$$

Nesta equação, o vetor ADS inclui os efeitos de cargas, variações de temperatura, pretensões e deslocamentos de apoio:

$$ADS = ADL + ADT + ADR \quad (4.2)$$

Quando se resolve a equação (4.1) em função dos deslocamentos, obtém-se a expressão seguinte:

$$D = S^{-1} (AD - ADS) \quad (4.3)$$

g- Determinação das ações nas extremidades das barras e reações nos apoios. Os vetores AM e AR para as ações de extremidade da barra e as reações, respectivamente, são obtidos das seguintes equações de superposição:

$$AM = AMS + AMD \times D \quad (4.4)$$

$$AR = ARS + ARD \times D \quad (4.5)$$

Nestas equações, os vetores AMS e ARS representam ações na estrutura restringida devidas a todas as causas, de tal modo que

$$AMS = AML + AMT + AMP + AMR \quad (4.6)$$

$$ARS = ARL + ART + ARP + ARR \quad (4.7)$$

Quando os vetores D, AM e AR tiverem sido obtidos, pode-se iniciar o cálculo de tensões máximas em cada barra, em conformidade com BEER & JOHNSTON [4], ODEN [17] e TIMOSHENKO & GODIER [24], buscando introduzir as mudanças de secções necessárias até atingir os níveis de tensões adotados ou especificados pelo fabricante do material.

4.7 Análise do Pórtico Espacial

O cálculo estrutural descrito no presente trabalho realiza a análise do pórtico espacial em conformidade com técnicas matriciais para análise estrutural desenvolvidas por GERE & WEAVER [12], VANDERBILT [26] e WEAVER [28].

Usualmente faz-se necessário, na análise estrutural, tratar com ações e deslocamentos que se correspondam uns aos outros, isto é, de tipos análogos e que estejam localizadas no mesmo ponto da estrutura.

4.7.1 Grau de Indeterminação Cinemática

No método da rigidez os deslocamentos nodais da estrutura são as incógnitas primárias sendo, portanto, importante avaliar a indeterminação cinemática N , que constitui-se em possíveis deslocamentos nodais quando a estrutura está submetida à cargas:

$$N = 6 \times NJ - NR \quad (4.10)$$

onde: NJ é o número de nós da estrutura

NR é o número de restrições da estrutura

Portanto, o grau de indeterminação cinemática da estrutura explicita o número de incógnitas a serem levantadas na análise estrutural.

4.7.2 Propriedades da Estrutura

O pórtico espacial formado pela estrutura portante do arado em questão (Figura 4.1.1) atende às seguintes especificações:

Número de barras (M) = 7

Número de nós (NJ) = 5

Número de restrições (NR) = 6

Número de nós restritos (RJ) = 3

Iterativamente são introduzidas as coordenadas dos nós, X(), Y() e Z(), em relação ao sistema de referência anteriormente estabelecido para a estrutura (Tabela 4.7.1):

| Nó(J) | X(J) | Y(J) | Z(J) |
|-------|------|------|------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 46 | 41,3 |
| 3 | 0 | 0 | 82,6 |
| 4 | 63 | 0 | 41,3 |
| 5 | 126 | 0 | 82,6 |

Tab. 4.7.1 -Coordenadas dos nós da estrutura do arado.

A partir dos dados de entrada determinam-se as propriedades físicas da secção, tais como a área AX(), os momentos de inér-

cia $IY()$ e $IZ()$, o momento torsor $IX()$, além dos comprimentos das barras $L()$ e seus cossenos diretores:

$$\begin{aligned}
 AX(I) &= A \times B - C \times D \\
 IY(I) &= B \times A^3 - D \times C^3 / 12 \\
 IZ(I) &= A \times B^3 - C \times D^3 / 12 && (4.9) \\
 IX(I) &= 2 \times (A - T)^2 \times (B - T)^2 \times T / A + B - 2 \times T \\
 L(I) &= (XCL^2 + YCL^2 + ZCL^2)^{0,5} \\
 XCL &= X(JK(I)) - X(JJ(I)) \\
 YCL &= Y(JK(I)) - Y(JJ(I)) \\
 ZCL &= Z(JK(I)) - Z(JJ(I)) \\
 CY &= YCL / L(I) \\
 CX &= XCL / L(I) \\
 CZ &= ZCL / L(I)
 \end{aligned}$$

Os posicionamentos das barras da estrutura no espaço são definidos pela orientação estabelecida para suas extremidades JJ e JK. A Tabela 4.7.2 resume a orientação estabelecida para cada barra, bem como registra o valor do indicador AA utilizado para definir o ângulo de rotação (alfa) que indica se os eixos principais de inércia da barra estão ou não inclinados em relação às coordenadas Y-Z da barra.

| Barra | JJ | JK | AA |
|-------|----|----|----|
| 1 | 1 | 3 | 0 |
| 2 | 1 | 2 | 0 |
| 3 | 2 | 3 | 0 |
| 4 | 1 | 4 | 0 |
| 5 | 4 | 5 | 0 |
| 6 | 3 | 5 | 0 |
| 7 | 2 | 4 | 0 |

Tab.4.7.2 Orientação das barras.

Os dados de entrada, pertinentes à estrutura, requeridos para o cálculo, estão resumidos na Tabela 4.7.3.

| Dados da estrutura | Número de casos | Ítems Necessários |
|----------------------------------|-----------------|---|
| Parâmetros considerados | 1 | M NJ NR RJ E G PE |
| Coordenadas dos nós | NJ | J XEJ] YEJ] ZEJ] |
| Designação e orientação da barra | M | I JJ]I] JK]I] AA |
| Lista de restrições de nó | RJ | K RLE6K-5] RLE6K-4] RLE6K-3] RLE6K-2] RLE6K-1] RLE6K] |

Tabela 4.7.3 - Dados de entrada relativos à estrutura e ao material considerado no projeto.

4.7.3 Matriz de Rotação

O fato de que cada nó tem seis possíveis deslocamentos confere à estrutura uma natureza de grande complexidade, tornando necessário a utilização de transformação de coordenadas pelo cálculo matricial, visando homogeneizar as matrizes de rigidez de cada barra para poderem ser somadas numa única matriz global de rigidez da estrutura.

A matriz de rotação R de cada barra é formada pelos cossenos diretores da barra e sua forma, portanto, depende da orientação particular dos eixos da barra.

Na estrutura em estudo, as barras estão orientadas de modo que os eixos principais da secção transversal existam nos planos horizontal e vertical. De modo que pode-se afirmar que a matriz de rotação é assim expressa:

$$R = \begin{vmatrix} & CX & & CY & & CZ \\ -CXC/Y / (CX^2+CZ^2) & & (CX^2+CZ^2) & & -CYCZ / (CX^2+CZ^2) & \\ -CZ / (CX^2+CZ^2) & & 0 & & CX / (CX^2+CZ^2) & \end{vmatrix} \quad (4.10)$$

Esta matriz de rotação é válida para todas as posições da barra, exceto quando esta for vertical.

A matriz de transformação de rotação para ações de deslocamentos nas extremidades das barras dos pórticos espaciais (RT) é composta por uma matriz constituída pelas matrizes de rotação, conforme equação (4.11).

$$RT = \begin{vmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R \end{vmatrix} \quad (4.11)$$

A aplicação dos conceitos de rotação de eixos, no método da rigidez, não se limita à transformação da matriz de rigidez das barras para os eixos da estrutura. São utilizados, também, na formação do vetor de cargas equivalentes AE dos elementos da matriz AML e no cálculo das ações finais nas extremidades da barra AM que consiste na superposição das ações iniciais na barra com os efeitos dos deslocamentos nodais.

As informações sobre as séries de restrições de nó são indicadas pelo número do nó K e os seis números codificados que se referem às condições de restrição neste nó. Quando houver restrição, por convenção, o valor de RL é igual a 1 e se não existir restrição é atribuído a ele o valor zero. Os termos $RL(6K-5)$ a $RL(6K)$ indicam as restrições contra as translações e rotações nas direções de X, Y e Z no nó K .

Foram desenvolvidos testes, considerando as mesmas condições de carga e de geometria para a estrutura do arado (Tabelas 4.7.4 a 4.7.6) para avaliar três condições de operação com o propósito de determinar a situação em que a estrutura é mais solicitada para, então, adotá-la como condição de projeto.

Na estrutura do arado, os nós 1, 2 e 3 (Fig. 4.1.1) constituem-se nos pontos de acoplamento ao sistema de engate de três pontos do trator que, portanto, lhes impõe algumas restrições. Por outro lado, o nó 4 estará sempre livre e o nó 5, enquanto tiver apoio na roda guia, também impõe restrições. Portanto, ocorrem as seguintes condições de restrições para as situações consideradas:

A- Operação normal, admitida para efeito de comparação como testemunha. Considera que o arado está devidamente regulado e operando em condições normais de funcionamento e de solo. As restrições que ocorrem nesta situação estão apresentadas na Tabela 4.7.4.

Nós 1 e 3 -restrições a deslocamentos nas direções X e Y devidas aos braços inferiores do sistema de engate do trator. Na direção Z não ocorrem restrições, pois ficam afrouxadas as correntes estabilizadoras, cabendo à roda guia suportar os esforços laterais.

Nó 2 - restrição somente na direção X, devida ao braço do terceiro ponto.

Nó 5 - restrições nas direções Y e Z, livre ao deslocamento na direção longitudinal e restrito de girar na direção Y.

| NÓ(K) | RL(ΔK-5) | RL(ΔK-4) | RL(ΔK-3) | RL(ΔK-2) | RL(ΔK-1) | RL(ΔK) |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Tabela 4.7.4- Condições de restrições para o arado em operação normal.

B- Operação sem apoio na roda guia, situação esta que pode ocorrer, mesmo que eventualmente, pelo afrouxamento do parafuso de fixação da roda guia ou pela perda transitória da sustentação

lateral ou vertical, o que provocará excessiva folga na corrente estabilizadora esquerda e tensionamento na direita. As restrições verificadas nesta situação estão listadas na Tabela 4.7.5.

Nós 4 e 5 - não apresentam restrições a deslocamento nem a giro em qualquer das direções.

| NÓ(K) | RL(6K-5) | RL(6K-4) | RL(6K-3) | RL(6K-2) | RL(6K-1) | RL(6K) |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 4.7.5 - Condições de restrições para o arado operando sem roda guia, com as correntes estabilizadora direita tensionada e esquerda afrouxada.

C- ídem ao ítem B, com a corrente estabilizadora esquerda sendo tensionada e a direita afrouxada. Ocasião em que verificam-se as restrições apresentadas na Tabela 4.7.6.

Nós 4 e 5 - Não apresentarão restrições a deslocamento nem a rotação.

| Nó(K) | RL(6K-5) | RL(6K-4) | RL(6K-3) | RL(6K-2) | RL(6K-1) | RL(6K) |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 4.7.6 - Condições de restrições para o arado operando sem roda guia, com as correntes estabilizadora direita afrouxada e esquerda tensionada.

Os testes realizados permitiram constatar que, em qualquer das duas situações, eventuais e pressupostas, as barras da estrutura têm suas tensões significativamente maiores que as verificadas na situação normal ou testemunha. Dentre as quais constatou-se que a diferença, embora exista, é pequena, com as tensões ligeiramente maiores na situação C, apresentada na Tabela 4.7.6.

Uma vez determinadas as condições de restrições da estrutura, calcula-se a lista de restrições acumulativas CRL, que consiste nas somas cumulativas dos números na lista de restrição RL, sendo que o primeiro elemento de CRL é sempre igual ao primeiro elemento de RL, e o último elemento de CRL é numericamente igual ao número total de restrições NR. Em uma instrução de controle iterativo, calculam-se em sequência todos os outros elementos de CRL.

4.7.5 Matriz de Rigidez da Estrutura

A matriz de rigidez é um quadro de valores que está determinado não só pela natureza da estrutura mas também se relaciona diretamente com o conjunto de ações e deslocamentos ora em consideração. Sua determinação pode ser obtida com o auxílio da matriz de rigidez da barra de pórtico espacial apresentada no Apêndice L.

Estabeleceu-se uma instrução de controle iterativo em função das barras, para M barras. Os seis possíveis deslocamentos para o nó da esquerda J (J_1 a J_6) e para o nó da direita K (k_1 a k_6) da barra I são indexados de acordo com o sistema de numeração das barras, conforme ilustrado na Figura 4.7.1.

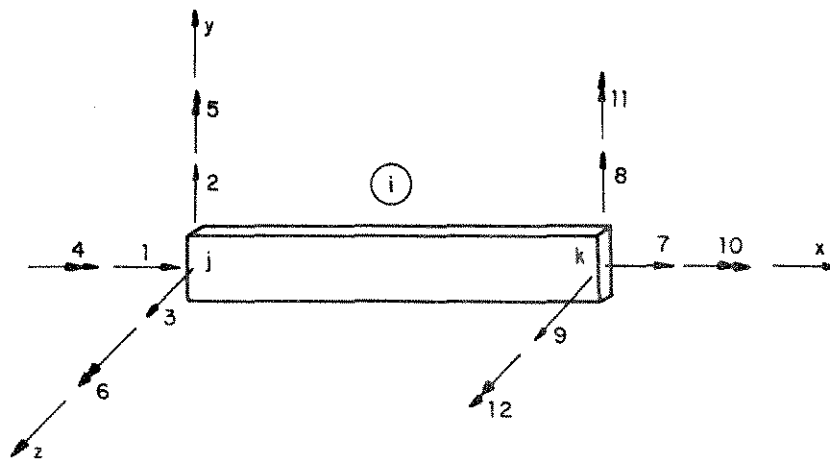


Figura 4.7.1 - Indexação da barra I.

Calculou-se as oito constantes de rigidez para as deformações axial, de torção e de flexão da barra, conforme as equações (4.12).

$$\begin{aligned}
M1 &= E \times AX(I) / L(I) & M5 &= 6 \times IX(I) / L(I) \\
M2 &= 4 \times E \times IY(I) / L(I) & Z2 &= 4 \times E \times IZ(I) / L(I) \\
M3 &= 1,5 \times M2 / L(I) & Z3 &= 1,5 \times Z2 / L(I) & (4.12) \\
M4 &= 2 \times M3 / L(I) & Z4 &= 2,0 \times Z3 / L(I)
\end{aligned}$$

Usando como guia a lista de restrições de nó, foram reindexados os seis possíveis deslocamentos para os nós em cada uma das extremidades da barra, tendo em consideração se os nós são realmente restringidos ou não. Isto é, se um certo deslocamento é livre de ocorrer, o índice é decrescido pelo correspondente elemento de CRL, colocando-o na ordem apropriada entre os graus de liberdade. De outro modo, se um deslocamento não é livre de ocorrer, o índice é recomposto para N mais o correspondente elemento de CRL, colocando-o na ordem apropriada entre as restrições de apoio.

A matriz de rigidez foi gerada, inicialmente, no seu próprio sistema de coordenadas, conforme Apêndice B, usando as constantes de rigidez anteriormente avaliadas.

Após, calculou-se uma matriz MR como uma etapa intermediária na transformação da matriz de rigidez da barra (SM) para a matriz de rigidez da barra para os eixos da estrutura (MD). Esta matriz intermediária foi calculada pós-multiplicando a matriz SM pela matriz de rotação RT, segundo a equação (4.13).

$$MR = SM \times RT \quad (4.13)$$

Então, a matriz MD, orientada com os eixos da estrutura, resultou na equação (4.14) cuja matriz resultante é algo complicada quando expressa por extenso, consistindo uma das principais vantagens dos métodos matriciais na análise de estruturas o poder representar conjuntos de relações tão extenso quanto este de modo tão conciso.

$$MD = RT' \times SM \times RT \quad (4.14)$$

No programa, a matriz RT não está formada realmente, pelo que usa-se a matriz de rotação R (que se converte em RT). Em seguida, calcula-se a matriz MD (Equação 4.15) pré-multiplicando a matriz MR pela transposta de RT.

$$MD = RT' \times MR \quad (4.15)$$

Se o índice &J;J (I) = 5 (valor original de J1) corresponde a um grau de liberdade, a primeira coluna de MD é transferida para a matriz de rigidez da estrutura, conforme (4.16).

$$\begin{aligned} (Sj)j1,j1 &= MD + (MD1,1)i & (Sj)k1,j1 &= (MD7,1)i \\ (Sj)j2,j1 &= MD + (MD2,1)i & (Sj)k2,j1 &= (MD8,1)i \\ (Sj)j3,j1 &= MD + (MD3,1)i & (Sj)k3,j1 &= (MD9,1)i \quad (4.16) \\ (Sj)j4,j1 &= MD + (MD4,1)i & (Sj)k4,j1 &= (MD10,1)i \\ (Sj)j5,j1 &= MD + (MD5,1)i & (Sj)k5,j1 &= (MD11,1)i \\ (Sj)j6,j1 &= MD + (MD6,1)i & (Sj)k6,j1 &= (MD12,1)i \end{aligned}$$

Outros onze conjuntos de expressões idênticas podem ser

escritos para fazer um total de doze conjuntos de equações, cada qual considerando a transferência de elementos de uma dada coluna da matriz MD para as localizações apropriadas na matriz Sj.

Todavia, se 6JJ (I)-5 corresponde a uma restrição, a primeira coluna de MD é ignorada. Por este artifício são geradas unicamente as partes necessárias da matriz de rigidez. O resultado é um quadro retangular que consiste na matriz S na parte superior e a matriz GRD na parte inferior.

Contudo, no programa o quadro completo é identificado como S. Os elementos de S, que incluem a ligação de J1 com J2 até J6 são acumulativos porque em geral recebem contribuições de mais de uma barra. Todavia, os elementos de S que incluem a ligação de J1 com K1 até K6, são os valores únicos. Este processo de transferência repete-se para todas as 12 colunas de MD.

4.7.6 Inversão da Matriz de Rigidez

A matriz de rigidez S usada na análise de rigidez é invertida durante o processo de resolução usando um método adequado como o desenvolvido no subprograma "Inverte Matriz", apresentado no Apêndice F. Sendo a matriz S formada pelas ações correspondentes aos deslocamentos de nó devidos a valores unitários desses deslocamentos, a matriz inversa deve ser formada pelos deslocamentos de nós devidos a valores unitários das ações correspondentes aos deslocamentos.

O cálculo dos deslocamentos numa estrutura, mediante equações matriciais, requer que a estrutura esteja submetida a cargas atuando unicamente nos nós. Porém, geralmente, as cargas reais numa estrutura não obedecem a este requisito. Por isto, as cargas podem ser divididas em dois tipos, a saber, cargas nodais e cargas nas barras.

As cargas nodais estão prontas para colocação imediata num vetor de ações a ser usado na solução, mas as cargas sobre as barras serão levadas em consideração calculando-se as ações de engastamento que produzem.

4.7.7.1 Cargas Nodais

Se o número de nós NLD carregados for diferente de zero, são lidas as designações dos nós e as ações neles aplicadas e armazenadas no vetor A. Tais ações são as forças aplicadas nas direções X, Y, Z e binários aplicados nos sentidos X, Y, Z em relação aos eixos orientados com os eixos da estrutura.

4.7.7.2 Cargas nas Barras

Quando existir cargas aplicadas fora dos nós, portanto, diretamente sobre as barras, devem ser substituídas por cargas estaticamente equivalentes que atuem nos nós. Neste caso, em uma instrução de controle iterativa para as barras com carga NLM, são

tidas as designações das barras carregadas e os dados relativos as cargas. Tais dados são transformados em doze ações de engastamento para cada barra. Estas ações, que atuam nas coordenadas da barra, são armazenadas no vetor AML e representam os esforços desenvolvidos pelo engastamento, necessários para manter em zero os deslocamentos nas extremidades das barras. Na Figura 4.7.7 estão representadas as ações, em direção e sentido positivos, e sua respectiva numeração.

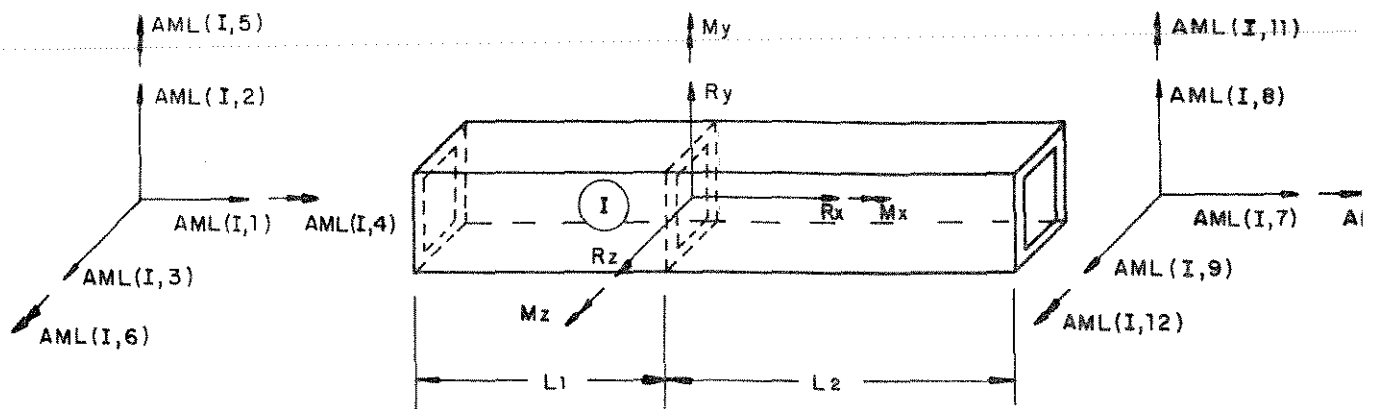


Figura 4.7.7 - Ações de engastamento na barra genérica I.

As equações para determinação das ações de engastamento podem ser obtidas através da tabela apresentada no Apêndice N.

$$\text{AML}(I,1) = -R_X \times L_2 / L(I) \quad (4.17)$$

$$\text{AML}(I,2) = -R_Y \times L_2^2 \times (3 \times L_1 + L_2) + 6 \times M_Z \times L_1 \times L_2 / L(I)^3$$

$$\text{AML}(I,3) = -R_Z \times L_2^2 \times (3 \times L_1 + L_2) - 6 \times M_Y \times L_1 \times L_2 / L(I)^3$$

$$\text{AML}(I,4) = -M_X \times L_2 / L(I)$$

$$\begin{aligned}
\text{AML}(I,4) &= MZ \times L2 \times (2 \times L1 - L2) - RY \times L1 \times L2^2 / L(I)^2 \\
\text{AML}(I,7) &= -RX \times L1 / L(I) \\
\text{AML}(I,8) &= -RY \times L1^2 \times (L1 + 3 \times L2) - 6 \times MZ \times L1 \times L2 / L(I)^3 \\
\text{AML}(I,9) &= -RZ \times L1^2 \times (L1 + 3 \times L2) + 6 \times MY \times L1 \times L2 / L(I)^3 \\
\text{AML}(I,10) &= -MX \times L1 / L(I) \\
\text{AML}(I,11) &= MY \times L1 \times (2 \times L2 - L1) - RZ \times L1^2 \times L2 / L(I)^2 \\
\text{AML}(I,12) &= MZ \times L1 \times (2 \times L2 - L1) + RY \times L1^2 \times L2 / L(I)^2
\end{aligned}$$

A seguir, as ações AML são tomadas, hipoteticamente, como cargas nodais equivalentes àquelas aplicadas ao longo da barra e, em uma instrução de controle iterativa para M barras, as contribuições de cada barra são identificadas e transferidas para o vetor de ações equivalente AE de cada barra.

4.8 Construção dos Vetores Associados às Cargas

4.8.1 Cargas Equivalentes

O método para obter o vetor de ações AE consiste em tomar as barras em sequência e avaliar suas contribuições uma a uma, e seu cálculo também considera os valores negativos das ações de encastramento para as barras. Cada uma das instruções para gerar um elemento de AE consiste numa soma de contribuições de mais do que uma barra, porque somente pontos extremos, eventualmente, recebem contribuições de uma só barra.

A construção do vetor AE, nas coordenadas da estrutura,

$$J = 1, 1, N+NR \quad (4.20)$$

A seguir, determina-se o índice referente à locação das ações no vetor AC, tendo em consideração que se o j-ésimo deslocamento possível não está restringido, o índice K para um elemento de AC é colocado na posição correta na primeira parte do vetor

$$K = J - CRL(J) \quad (4.21)$$

Todavia, se o j-ésimo deslocamento possível está restringido, o índice K é colocado na posição correta na última parte do vetor.

$$K = N + CRL(J) \quad (4.22)$$

Calcula-se o vetor de ações combinadas através da equação (4.23).

$$AC(K) = A(J) + AE(J) \quad (4.23)$$

O vetor AC é formado por duas partes. A primeira representa a soma das cargas nodais reais e equivalentes, correspondentes aos graus de liberdade conhecidos. Portanto, esta parte do vetor AC é o vetor AD. A segunda parte do vetor AC consiste na soma das cargas nodais reais equivalentes correspondentes às restrições de apoio sobre a estrutura. Se os sinais dos elementos desta parte de AC são invertidos, aparece o vetor ARL. Assim sendo, o vetor de cargas combinadas AC está composto como expresso em (4.24).

$$AC = \begin{vmatrix} AD \\ \dots \\ -ARL \end{vmatrix} \quad (4.24)$$

4.9 Cálculo de Ações nas Extremidades de Barras

Nesta etapa da análise foram calculados todos os deslocamentos nodais, reações de apoio e ações de extremidades de barra.

Nas estruturas espaciais, que constituem o tipo mais comum de estruturas reticuladas, uma barra típica I pode ter no máximo seis ações de extremidade em cada nó e são numeradas, sistematicamente, tomando pela ordem X_m , Y_m e Z_m , conforme Figura 4.9.1., na qual as flechas com uma seta indicam força e com seta dupla indicam binários.

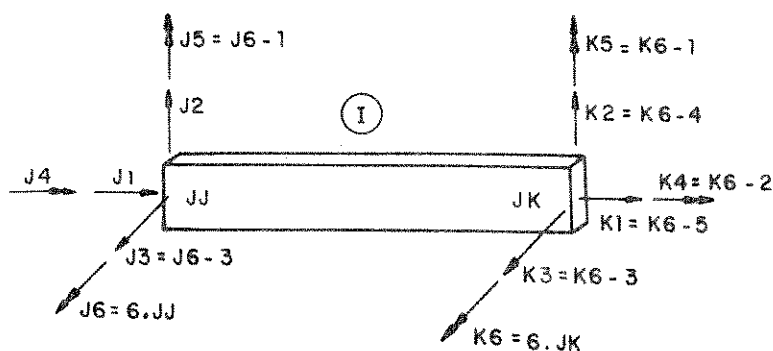


Figura 4.9.1 - Numeração das ações nas extremidades da barra.

4.9.1 Deslocamentos de Nó e Reações de Apoio

Os deslocamentos desconhecidos D são encontrados por sub_

stituição das matrizes AD e da inversa de S na equação (4.25).

$$D = S^{-1} \cdot AD \quad (4.25)$$

As reacções de apoio AR são calculadas por álgebra matricial substituindo as matrizes ARL, SRD e D em (4.26).

$$AR = ARL + SRD \cdot D \quad (4.26)$$

4.9.2 Acções nas Extremidades das Barras

As acções de extremidade finais numa barra dada consiste na superposição de acções de engastamento iniciais com os efeitos adicionais causados pelos deslocamentos das extremidades da barra. Esta superposição de acções está expressa para a i-ésima barra da estrutura pela equação (4.27).

$$[AM]_i = [AHL]_i + (SM)_i \times [Dm]_i \quad (4.27)$$

Nesta expressão [AM]_i é o vetor de acções finais de extremidade. [AHL]_i o vetor de acções de engastamento e (SM)_i a matriz de rigidez da barra genérica i.

O vetor [Dm]_i é formado pelos deslocamentos das extremidades da barra portanto, deve ser determinado a partir do vetor de deslocamentos nodais Dj. Como os primeiros deslocamentos estão

nas direções dos eixos da estrutura e os últimos estão nas direções dos eixos da barra, obtém-se o vetor $[Dm]_i$ pela seguinte transformação.

$$[Dm]_i = (RT)_i \times [Dj]_i \quad (4.28)$$

onde $[Dj]_i$ é o vetor de deslocamentos nodais para as extremidades da barra. Substituindo (4.28) em (4.27) resulta a expressão (4.29).

$$[AM]_i = [AML]_i \times (SM)_i \times (RT)_i \times [Dj]_i \quad (4.29)$$

Nos pórticos espaciais a determinação das ações $[AM]$ é feita tomando uma barra por vez; para tanto, faz-se uma instrução de controle iterativa sobre barras, para M barras da estrutura. Este vetor é formado por doze elementos, sendo três forças e três binários nas direções X_m , Y_m e Z_m em cada extremidade da barra.

Quando as ações nas extremidades tiverem sido obtidas, ter-se-á os elementos necessários para o preciso dimensionamento da estrutura.

Os dados de entrada, pertinentes às cargas, requeridos para o cálculo estão resumidos na Tabela 4.9.1.

| Dados de Carga | Número de Casos | Ítems Necessários |
|---|-----------------|--|
| Número de nós e de barras com carga | 1 | NLJ NLM |
| Ações aplicadas nos nós | NLJ | k AE6K-5J AE6K-4J AE6K-3J AE6K-2J AE6K-1J AE6KJ |
| Ações nos extremos das barras restringidas de- vidas as cargas | 2NLM | T AMLCI,1J AMLCI,2J AMLCI,3J AMLCI,4J AMLCI,5J AMLCI,6J AMLCI,7J AMLCI,8J AMLCI,9J AMLCI,10J AMLCI,11JAMLCI,12J |

Tabela 4.9.1 - Dados de entrada relativos às cargas.

4.9.3 Armazenamento das Ações.

As ações de extremidade de barra podem ser armazenadas no arquivo de dados AN gerado pelo subprograma "Guarda Ações", Apêndice F, para posterior utilização na determinação da tensão máxima.

4.10 Tensão Máxima na Barra

Tendo em consideração a funcionalidade e a estética do conjunto, as medidas correspondentes à altura das barras (B) foram uniformizadas em 40 mm e atribuiu-se a mesma variável (A2) para a largura das barras 2 e 3, porque formam a torre do implemento. O mesmo procedimento tomou-se em relação às barras 4 e 5, por constituírem a viga principal do arado, designando por A3 sua variável de largura.

As variáveis dimensionais da secção transversal das barras foram introduzidas em cada resolução do programa, para geração do banco de dados de tensões máximas, através do subprograma "Varia Secção", Apêndice I.

A sumarização destas variáveis está apresentada na Tabela 4.10.1, onde usa-se a seguinte simbologia:

A1= largura da barra 1

A2= largura das barras 2 e 3

A3= largura das barras 4 e 5

A4= largura da barra 6

A5= largura da barra 7

A6= largura das barras 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7

A7= largura das barras 4 e 5

| BARRA | LARGURA | ESPESSURA |
|-------|---------|-----------|
| 1 | A1 | A6 |
| 2 | A2 | A6 |
| 3 | A2 | A6 |
| 4 | A3 | A7 |
| 5 | A3 | A7 |
| 6 | A4 | A6 |
| 7 | A5 | A6 |

Tab. 4.10.1 - Variáveis da estrutura.

Estas variáveis podem assumir os valores dados na Tabela 4.10.2.

| VARIÁVEL | VALORES ASSUMIDOS (mm) | | |
|----------|------------------------|-------|-------|
| A1 | 20,00 | 30,00 | 40,00 |
| A2 | 20,00 | 30,00 | 40,00 |
| A3 | 60,00 | 70,00 | 80,00 |
| A4 | 20,00 | 30,00 | 40,00 |
| A5 | 20,00 | 30,00 | 40,00 |
| A6 | 2,03 | 2,64 | 3,25 |
| A7 | 5,69 | 6,51 | 7,33 |

Tab. 4.10.2 - Valores que as variáveis da estrutura podem assumir.

A distribuição de tensões causadas pelas forças cortantes $AM(I,2)$ e $AM(I,3)$ na secção transversal da barra é uma distribuição de tensão de cisalhamento.

A determinação das tensões de cisalhamento devidas à força vertical $AM(I,2)$ e à força horizontal $AM(I,3)$ é dada por T_Y e T_Z , conforme equações (4.30) e (4.31), sendo $(Msz)_c$ o momento estático da área abaixo da linha de corte com relação ao eixo Z, obtido pelo produto entre a área acima da linha de atuação da força cortante e seu centróide.

$$T_Y = \frac{AM(I,2) \times (Msz)_c}{A \times IZ(I)} \quad T_Z = \frac{AM(I,3) \times (Msy)_c}{B \times IY(I)} \quad (4.30)$$

$$(4.31)$$

Para o cálculo das tensões nos pontos médios das laterais da secção, determinou-se o centróide da metade da secção através das relações de (4.32) (Figura 4.10.1).

$$Y_G = \frac{2 \times B \times (C + T) + C^2}{4 \times (B + C)} \quad (4.32)$$

$$Z_G = \frac{2 \times A \times (D + T) + D^2}{4 \times (A + D)}$$

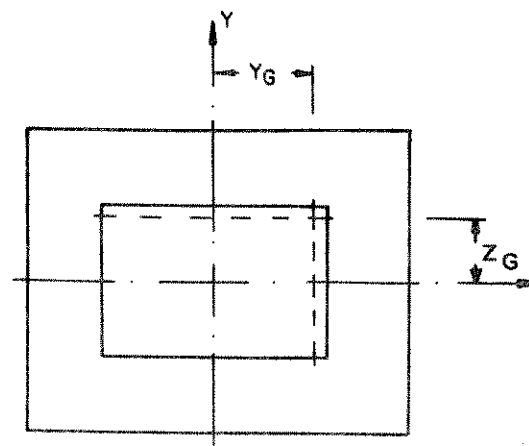


Fig. 4.10.1 - Centróide da metade da secção.

O cálculo das tensões é processado logo a seguir, através das seguintes equações:

- devido à tração ou compressão.

$$T1 = \frac{AM(I,1)}{AX(I)} \quad C1 = T1 \quad (4.33)$$

- devido ao cisalhamento.

-para pontos no contorno externo da secção.

$$T2 = \frac{AM(I,2) \times AX(I) \times Y0}{2 \times IZ(I) \times (A - C)} \quad T3 = \frac{AM(I,3) \times AX(I) \times Z0}{2 \times IY(I) \times (B - D)} \quad (4.34)$$

-para pontos no contorno interno da secção.

$$C2 = \frac{AM(I,2) \times T \times (D + T)}{2 \times IZ(I)} \quad C3 = \frac{AM(I,3) \times T \times (C + T)}{2 \times IY(I)} \quad (4.35)$$

- devido à torção.

$$T4 = \frac{AM(I,4)}{2 \times AP \times T} \quad C4 = T4 \quad (4.36)$$

Foi calculada a tensão equivalente a partir do extremo JJ a intervalos de 10 mm, até detectar-se a tensão máxima a ser tomada como referência para o dimensionamento da barra.

- para X variando de 0 até L(I), as ações nas sucessivas secções podem ser obtidas pelas equações (4.37).

$$\begin{aligned}
 AM(I,1)x &= AM(I,1)o \\
 AM(I,2)x &= AM(I,2)o \\
 AM(I,3)x &= AM(I,3)o && (4.37) \\
 AM(I,4)x &= AM(I,4)o \\
 AM(I,5)x &= AM(I,5)o + AM(I,3) \times X \\
 AM(I,6)x &= AM(I,6)o - AM(I,2) \times X
 \end{aligned}$$

As tensões de tração ou compressão devidas à flexão variam ao longo da barra sendo, então, expressas em função da distância X a partir da extremidade JJ, em que X = 0, até a extremidade JK em que X = L(I).

$$\begin{aligned}
 YM &= AM(I,5) + AM(I,3) \times X \\
 ZM &= AM(I,6) - AM(I,2) \times X && (4.38)
 \end{aligned}$$

Portanto, as tensões nos pontos do contorno externo da secção, T5 e T6, são dadas pelas equações (4.39).

$$\begin{aligned}
 T5 &= \frac{YM \times A}{2 \times IY(I)} && T6 = \frac{ZM \times B}{2 \times IZ(I)} && (4.39)
 \end{aligned}$$

tem-se:

$$\begin{aligned} C5 &= \frac{YM \times D}{2 \times IY(I)} & C6 &= \frac{ZM \times D}{2 \times IZ(I)} \end{aligned} \quad (4.40)$$

O arado, Figura 4.1.1, tem a coluna do disco intermediária localizada sobre o nó 4 sendo que as ações resultantes são tratadas, na análise da estrutura, como cargas nodais.

As outras duas colunas são fixadas sobre as barras 4 e 5, tornando necessário o estudo diferenciado das suas tensões. A determinação das tensões máximas nestas barras é feita para cada secção a partir de $X=0$; porém, para X além do ponto onde estão localizadas as cargas externas (colunas de disco), os efeitos são acrescidos das ações resultantes nas secções subsequentes, conforme as equações (4.14).

Então, para toda e qualquer secção posterior ao ponto de fixação da coluna, são válidas as ações (4.41), determinadas através do subprograma "Ações na Barra", Apêndice E.

$$\begin{aligned} AM(I,1) &= AM(I,1) + RX \\ AM(I,2) &= AM(I,2) + RY \\ AM(I,3) &= AM(I,3) + RZ \\ AM(I,4) &= AM(I,4) + MZ \\ AM(I,5) &= AM(I,5) + AM(I,3) \times X + MY + RZ \times (X - L1) \\ AM(I,6) &= AM(I,6) + AM(I,2) \times X + MZ - RY \times (X - L1) \end{aligned} \quad (4.41)$$

Este subprograma determina as ações nas secções das barras e encaminha o cálculo das tensões e retorna os novos valores para o programa principal que os endereça para o subprograma "Tensão Máxima", Apêndice J.

Foram avaliados dezesseis pontos críticos na secção, sendo seis no contorno externo e outro tanto no contorno interno. A Figura 4.10.2 ilustra uma secção transversal da barra e os pontos cujas tensões, geradas pelo carregamento decorrente da operação agrícola de aração, foram determinados e analisados.

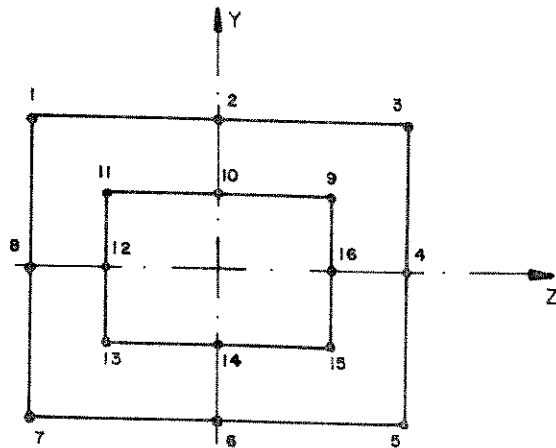


Figura 4.10.2 - Pontos pesquisados na secção da barra.

Foi determinada a tensão máxima em cada ponto, através da equação (4.42) e comparada com a do ponto subsequente, sendo selecionada a maior delas. Após percorrer todos os dezesseis pontos em estudo, a tensão resultante é a tensão máxima da secção.

$$TMAX = \sqrt{((TX / 2) ^ 2 + TY ^ 2)} \quad (4.42)$$

4.11 Geração das Equações Empíricas

Com o auxílio de um computador Exato CCE foi criado um banco de dados de tensões máximas nas barras da estrutura, obedecendo ao plano de pesquisa previamente estabelecido, objetivando a geração de equações empíricas de tensões máximas nas barras da estrutura, conforme Apêndice O.

Para efeito de elaboração do referido plano foi estabelecido a seguinte codificação para os três níveis de valores para as variáveis da estrutura.

$$A1 \begin{cases} 20 = -1 \\ 30 = 0 \\ 40 = 1 \end{cases} \quad A2 \begin{cases} 20 = -1 \\ 30 = 0 \\ 40 = 1 \end{cases} \quad A3 \begin{cases} 20 = -1 \\ 30 = 0 \\ 40 = 1 \end{cases} \quad A4 \begin{cases} 20 = -1 \\ 30 = 0 \\ 40 = 1 \end{cases}$$

$$A5 \begin{cases} 20 = -1 \\ 30 = 0 \\ 40 = 1 \end{cases} \quad A6 \begin{cases} 2.03 = -1 \\ 2.64 = 0 \\ 3.25 = 1 \end{cases} \quad A7 \begin{cases} 5.69 = -1 \\ 6.51 = 0 \\ 7.33 = 1 \end{cases}$$

Com o auxílio do pacote estatístico Minitab II, desenvolvido para computadores digitais, foi encetada a análise de regressão linear múltipla das colunas de variáveis da estrutura com cada uma das colunas de tensões obtidas pelo cálculo estrutural, gerando, assim, as ditas equações.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados advindos dos estudos desenvolvidos para a análise da estrutura do arado de três discos e posterior geração de equações empíricas de tensões máximas para as barras que o constituem estão apresentados e discutidos neste capítulo.

5.1 Condições de Apoio

As condições de apoio desempenham importante papel na distribuição de tensões nas barras de qualquer estrutura. Assim sendo foram analisadas e testadas três situações de operação com diferentes condições de apoio, sujeitas a ocorrerem quando o arado realiza o preparo do solo para implantação de uma lavoura, conforme delineado no item 4.7.4.

A primeira condição de apoio estudada, denominada situação A, foi tomada como testemunha para efeito de comparação com as demais. Nesta considerou-se que o arado foi regulado dentro das especificações técnicas recomendadas para a operação agrícola de aradura, trabalhando em uma lavoura com boas condições topográfica e de solo. Portanto, as correntes estabilizadoras do arado em re-

lação ao trator, permaneceram afrouxadas cabendo à roda guia, nó 5, manter a estabilidade transversal do conjunto, enquanto aos pontos engate do arado ao trator, nós 1, 2 e 3, cabe a responsabilidade de manter o equilíbrio longitudinal e vertical, conforme sumarizado na Tabela 4.7.4.

Nas demais situações pesquisadas considerou-se que o arado tenha perdido a sustentação na roda guia e, portanto, cabendo às correntes estabilizadoras suportar os esforços transversais. Quando a resultante destes esforços atuar no sentido horário, caberá à corrente estabilizadora direita suportá-la, caracterizando a denominada situação B. Quando atuar no sentido anti-horário tensionará a corrente estabilizadora esquerda, caracterizando a situação C, conforme resumido nas Tabelas 4.7.5 e 4.7.6. Estas duas situações podem ocorrer no decurso da jornada de trabalho, principalmente em solos argilosos com unidade acima da ideal para aração, comumente verificada no preparo de lavouras localizadas em várzeas e nas de arroz irrigado e em lavouras com topografia acidentada ou com toca de animais.

Para efeito de comparação, objetivando determinar a situação em que as barras da estrutura são mais solicitadas, foram tomadas ao acaso, no plano de pesquisa, quatro combinações de dimensões das seções das barras, largura e espessura, Tabelas 5.1.1 a 5.1.4, e mais duas outras combinações hipotéticas, Tabelas 5.1.5 e 5.1.6.

| Barra | Situação A | Situação B | Situação C |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 3380 | 3381 | 4317 |
| 2 | 4732 | 6051 | 5589 |
| 3 | 1200 | 2224 | 2181 |
| 4 | 4201 | 7594 | 7595 |
| 5 | 4640 | 5468 | 5468 |
| 6 | 1428 | 2198 | 2201 |
| 7 | 1642 | 5327 | 5320 |

Tab. 5.1.1 - Tensão máxima nas barras (N/cm²) para as três situações de apoio considerando as variáveis $A_1=A_2=A_4=A_5=2$, $A_3=6$, $A_6=0,203$ e $A_7=0,569$ (cm)

| Barra | Situação A | Situação B | Situação C |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 2474 | 1938 | 2595 |
| 2 | 3195 | 4403 | 4361 |
| 3 | 1049 | 1420 | 1393 |
| 4 | 4069 | 7460 | 7459 |
| 5 | 4564 | 5462 | 5463 |
| 6 | 1598 | 2963 | 2983 |
| 7 | 1189 | 5624 | 5616 |

Tab. 5.1.2 - Tensão máxima nas barras (N/cm²) para as três situações de apoio considerando as variáveis $A_1=A_2=4$, $A_3=6$, $A_4=A_5=2$, $A_6=0,203$, $A_7=0,569$ (cm)

| Barra | Situação A | Situação B | Situação C |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 1443 | 1221 | 1686 |
| 2 | 2118 | 2753 | 2726 |
| 3 | 526 | 808 | 790 |
| 4 | 2544 | 4321 | 4322 |
| 5 | 3052 | 3550 | 3551 |
| 6 | 936 | 1725 | 1737 |
| 7 | 928 | 4143 | 4135 |

Tab. 5.1.3 - Tensão máxima nas barras (N/cm²) para as três situações de apoio considerando A₁=A₂=4, A₃=8 A₄=2, A₅=4, A₆=0,325, A₇=0,733 (cm).

| Barra | Situação A | Situação B | Situação C |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 1785 | 1764 | 2182 |
| 2 | 2491 | 2946 | 2905 |
| 3 | 718 | 1053 | 1087 |
| 4 | 2577 | 4794 | 4795 |
| 5 | 3029 | 3428 | 3425 |
| 6 | 808 | 1447 | 1452 |
| 7 | 847 | 3433 | 3431 |

Tab. 5.1.4 - Tensão máxima nas barras (N/cm²) para as três situações de apoio considerando A₁=4 A₂= 2 A₃=8, A₄=4, A₅=2 A₆=0,325, A₇=0,733 (cm).

| Barra | Situação A | Situação B | Situação C |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 2732 | 2529 | 3090 |
| 2 | 2782 | 3997 | 3972 |
| 3 | 1329 | 3112 | 3130 |
| 4 | 6471 | 9388 | 9389 |
| 5 | 6927 | 8164 | 8159 |
| 6 | 991 | 2064 | 2068 |
| 7 | 1732 | 6230 | 6228 |

Tab. 5.1.5 - Tensão máxima nas barras (N/cm²) para as três situações de apoio considerando A₁=1, A₂=2, A₃=4, A₄=3, A₅=2, A₆=A₇=0,5 (cm).

| Barra | Situação A | Situação B | Situação C |
|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 2432 | 2171 | 2670 |
| 2 | 2908 | 4068 | 4036 |
| 3 | 1005 | 1739 | 1716 |
| 4 | 4474 | 7338 | 7339 |
| 5 | 4867 | 5789 | 5789 |
| 6 | 949 | 1863 | 1869 |
| 7 | 900 | 5025 | 5023 |

Tab. 5.1.6 - Tensão máxima nas barras (N/cm²) para as três situações de apoio considerando A₁=2, A₂=A₄=A₅=2, A₃=5, A₆=0,4, A₇=0,7 (cm).

Da análise das tabelas acima verificou-se que a tensão máxima na situação A é, em média, 35% menor que na situação B e 37% menor que na situação C.

Das situações B e C constatou-se uma distribuição de tensões muito semelhante, pois em todas as barras elas atingem valores que oscilam dentro de uma faixa muito estreita, 0,1 a 2,6% com exceção da barra 1 que na situação B apresenta uma tensão média 21,5% menor que na situação C.

Devido a estas apreciações resolveu-se por escolher a situação C como a condição de apoio a ser adotada no projeto do arado, pois assim procedendo, intercede-se em favor da segurança do projeto e, conseqüentemente, no aumento da confiabilidade nas equações empíricas de tensões máximas geradas.

5.2 Pontos de Tensão Máxima

Com o auxílio do subprograma "Tensão Máxima", Apêndice J, verificou-se que numa secção retangular vazada submetida à flexão ocorrem concentrações de tensões nas dobras internas e externas, mas que na combinação com torção as tensões podem ser maiores na metade do lado maior da secção. Portanto, foram determinadas e avaliadas as tensões máximas em pontos internos e externos das dobras e na metade das laterais, concluindo-se que, para as magnitudes de tensões registradas na estrutura do arado em operação, as tensões são maiores nas dobras externas da secção.

5.3 Modelos Matemáticos

Com o objetivo de obter modelos matemáticos que representem os dados experimentais e que possam ser utilizados em novos projetos de arados, aplicou-se a análise de regressão linear múltipla, MINITAB [16], ao banco de dados, constituído por colunas de combinações das variáveis independentes (A1 a A7), formadas por larguras e espessuras das barras estruturais do arado, e as respectivas variáveis dependentes (TMAX1 a TMAX7), que representam as tensões máximas em algum ponto do comprimento das barras.

Tendo em vista que as variáveis independentes podem assumir três níveis de valores, codificou-se, para efeito de regressão, como -1 e 1 os níveis extremos e 0 (zero), o nível médio da variação. As colunas formadas pelas combinações das variáveis codificadas, designadas C1 a C7, foram regredidas com cada uma das colunas de tensões máximas, TMAX1 a TMAX7, gerando as equações empíricas de tensão máxima para cada barra da estrutura. A equação (5.1) expressa de forma genérica a tensão máxima na estrutura e os parâmetros estimados para cada barra estão listados na Tabela 5.3.1.

$$\begin{aligned} TMAX\ I = & B_0 + B_1 \times C_1 + B_2 \times C_2 + B_3 \times C_3 + B_4 \times C_4 + B_5 \times C_5 + & (5.1) \\ & + B_6 \times C_6 + B_7 \times C_7 + B_8 \times C_1 \times C_2 + B_9 \times C_1 \times C_3 + \\ & + B_{10} \times C_1 \times C_4 + B_{11} \times C_1 \times C_5 + B_{12} \times C_1 \times C_6 + B_{13} \times C_1 \times C_7 + \\ & + B_{14} \times C_2 \times C_3 + B_{15} \times C_2 \times C_4 + B_{16} \times C_2 \times C_5 + B_{17} \times C_2 \times C_6 + \\ & + B_{18} \times C_2 \times C_7 + B_{19} \times C_3 \times C_4 + B_{20} \times C_3 \times C_5 + B_{21} \times C_3 \times C_6 + \\ & + B_{22} \times C_3 \times C_7 + B_{23} \times C_4 \times C_5 + B_{24} \times C_4 \times C_6 + B_{25} \times C_4 \times C_7 + \\ & + B_{26} \times C_5 \times C_6 + B_{27} \times C_5 \times C_7 + B_{28} \times C_6 \times C_7 + B_{29} \times C_1 \times C_1 + \\ & + B_{30} \times C_2 \times C_2 + B_{31} \times C_3 \times C_3 + B_{32} \times C_4 \times C_4 + B_{33} \times C_5 \times C_5 + \\ & + B_{34} \times C_6 \times C_6 + B_{35} \times C_7 \times C_7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{onde: } C1 &= A1 - 3 \\
C2 &= A2 - 3 \\
C3 &= A3 - 7 \\
C4 &= A4 - 3 \\
C5 &= A5 - 3 \\
C6 &= (A6 - 0,264) / 0,061 \\
C7 &= (A7 - 0,651) / 0,082
\end{aligned}
\tag{5.2}$$

| Parâmetro | Barra1 | Barra2 | Barra3 | Barra4 | Barra5 | Barra6 | Barra7 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B0 | 255,70 | 322,35 | 141,99 | 495,05 | 394,52 | 200,94 | 443,22 |
| B1 | -38,10 | -32,63 | -13,16 | - 1,67 | - 0,33 | 10,22 | - 3,24 |
| B2 | -24,11 | -28,48 | -13,94 | - 5,51 | 0,90 | 14,64 | 14,41 |
| B3 | - 3,41 | - 2,55 | -15,44 | -63,97 | -60,86 | -20,84 | -45,01 |
| B4 | - 0,96 | -24,78 | 16,19 | -10,06 | - 8,33 | -11,19 | - 8,12 |
| B5 | -11,48 | -18,98 | - 2,74 | -34,46 | - 1,58 | - 8,30 | 20,53 |
| B6 | -40,45 | -56,60 | - 9,60 | -17,05 | - 1,98 | -14,93 | -24,76 |
| B7 | - 1,57 | - 1,55 | - 6,14 | -32,29 | -27,21 | - 8,05 | -21,43 |
| B8 | 3,11 | 8,17 | 6,68 | 0,83 | - 0,15 | - 4,46 | - 0,32 |
| B9 | 0,97 | 2,05 | 0,63 | 0,35 | - 0,01 | - 0,57 | 1,14 |
| B10 | 0,65 | 0,72 | - 6,58 | 0,07 | - 0,13 | - 5,61 | 0,81 |
| B11 | 2,97 | 3,67 | 0,52 | 0,12 | 0,10 | 0,19 | 0,44 |
| B12 | 5,76 | 4,01 | 0,08 | - 0,88 | 0,02 | 0,12 | 0,19 |
| B13 | 0,00 | 0,89 | 0,56 | - 1,24 | - 1,02 | - 0,60 | - 1,44 |
| B14 | 0,41 | 2,84 | 0,51 | 0,96 | 0,39 | - 2,60 | 0,51 |

| | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B15 | 0,38 | 4,16 | 0,64 | - 0,83 | 0,75 | - 1,04 | - 2,29 |
| B16 | 1,92 | - 1,61 | - 1,38 | - 0,64 | 0,18 | - 1,25 | - 0,78 |
| B17 | 4,81 | 2,00 | 1,14 | - 0,21 | 0,29 | - 0,36 | - 3,54 |
| B18 | - 0,04 | 1,05 | 0,40 | - 0,93 | - 1,21 | - 1,42 | - 0,10 |
| B19 | - 0,17 | 1,46 | - 5,96 | 2,33 | 2,01 | 2,28 | 1,98 |
| B20 | - 1,15 | 0,58 | 0,24 | 7,13 | 0,43 | 1,67 | 4,62 |
| B21 | - 0,50 | 0,94 | - 0,12 | 3,02 | 0,62 | 1,70 | 5,46 |
| B22 | 0,05 | - 1,17 | 0,60 | 1,21 | 2,42 | 0,45 | - 0,84 |
| B23 | 1,16 | 3,86 | 1,64 | 1,48 | - 0,08 | 0,71 | - 2,54 |
| B24 | 0,88 | 1,81 | 4,30 | - 1,44 | - 1,61 | - 1,22 | - 0,66 |
| B25 | 0,02 | 0,72 | - 1,62 | 2,52 | 2,13 | 1,35 | 1,03 |
| B26 | 3,11 | 3,16 | - 0,66 | - 1,93 | - 0,14 | 0,19 | - 7,43 |
| B27 | - 0,20 | 0,71 | 0,23 | 2,24 | - 0,81 | 0,58 | 0,11 |
| B28 | 0,03 | 0,43 | 0,08 | 0,36 | - 0,60 | 0,63 | 1,02 |
| B29 | 5,76 | 11,32 | 0,15 | 9,84 | 6,03 | - 0,49 | 5,24 |
| B30 | 4,87 | 5,00 | - 7,58 | 11,76 | 5,76 | - 2,11 | 0,23 |
| B31 | 1,52 | 7,82 | 2,33 | 16,79 | 15,57 | 1,10 | 9,72 |
| B32 | 0,48 | 9,70 | 2,86 | 10,16 | 5,34 | 2,19 | 5,61 |
| B33 | 0,99 | 6,60 | - 1,82 | 11,64 | 5,71 | - 2,48 | - 5,07 |
| B34 | 3,00 | 15,49 | 10,41 | 11,92 | 4,08 | - 6,18 | 4,25 |
| B35 | 1,80 | 7,07 | 2,85 | 11,46 | 8,20 | 1,91 | 7,55 |

Tabela 5.3.1 - Parâmetros da equação de regressão para determinação das tensões máximas nas barras estruturais do arado de três discos.

As Tabelas 5.3.2 e 5.3.4 mostram um resumo dos parâmetros da análise estatística, onde os elevados coeficientes de correlação múltipla (R), associados aos baixos valores de dispersão (S), significativos ao nível de 1%, indicam que o modelo matemático proposto representa satisfatoriamente o fenômeno em questão.

| Parâmetro | Barra1 | Barra2 | Barra3 | Barra4 | Barra5 | Barra6 | Barra7 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S | 5,22 | 14,36 | 11,45 | 8,23 | 9,03 | 6,82 | 10,01 |
| R | 99,50 | 97,60 | 93,10 | 99,30 | 99,00 | 97,50 | 98,20 |
| R* | 99,40 | 96,80 | 90,90 | 99,10 | 98,60 | 96,60 | 97,60 |

Tabela 5.3.2 - Dados da avaliação estatística das equações empíricas de tensão máxima (TMAX).

R* Coeficiente de correlação ajustado aos graus de liberdade da equação.

Tendo em consideração que a barra 2 foi a que apresentou o maior grau de desvio e que a barra 4 é a barra de maior responsabilidade no contexto da presente estrutura, pois é a barra principal e suporta as maiores tensões, foram elaboradas as Figuras 5.3.1 e 5.3.2 mostrando os gráficos de distribuição das tensões máximas obtidas pelo cálculo estrutural computadorizado e as obtidas através da equação empírica de tensões máximas, eq. (5.1), usando os parâmetros estimados para as respectivas barras (Tabela 5.3.1) tendo registrado, comparativamente, reduzidos níveis de desvios.

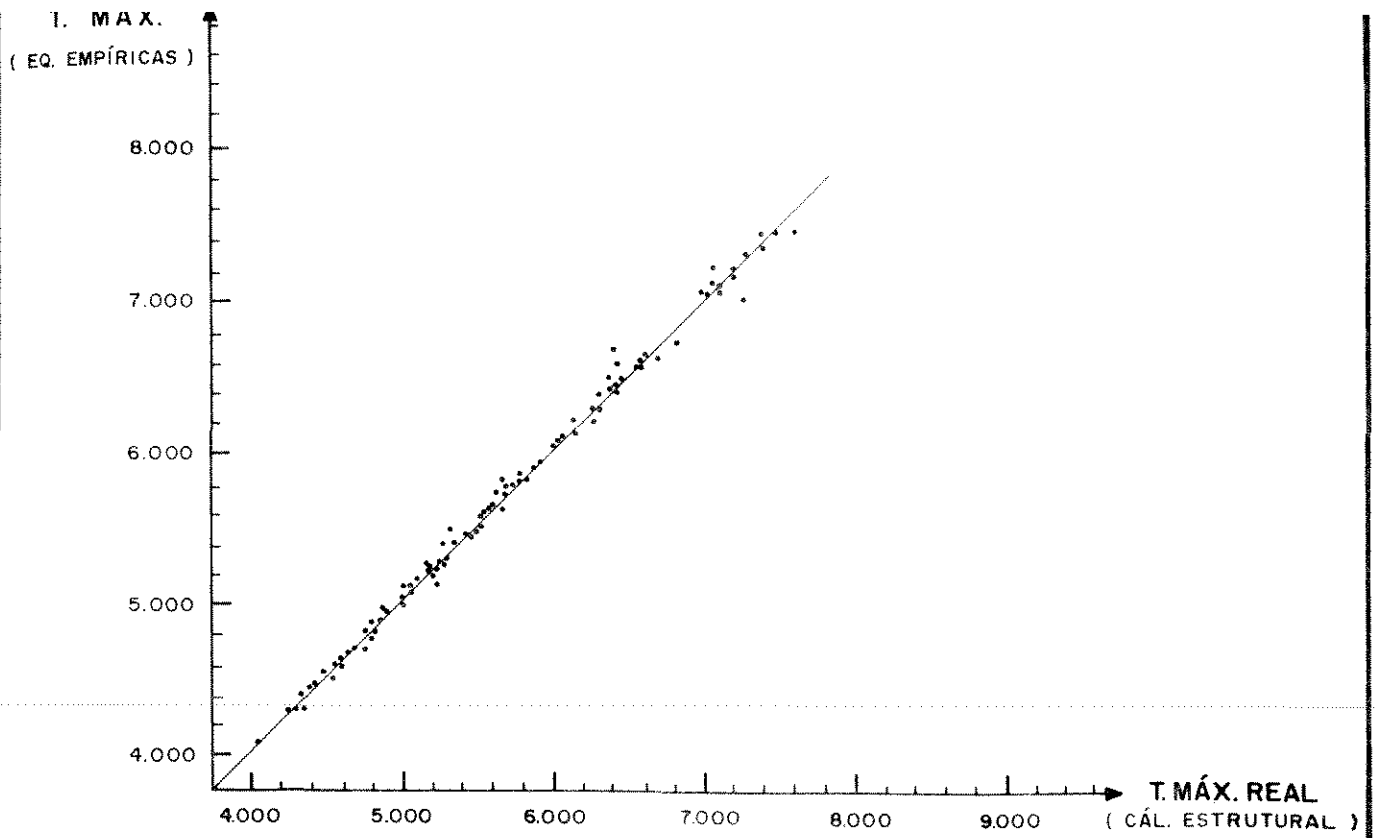


Figura 5.3.1. — Gráfico de tensões máximas na barra 2 (N/cm^2).

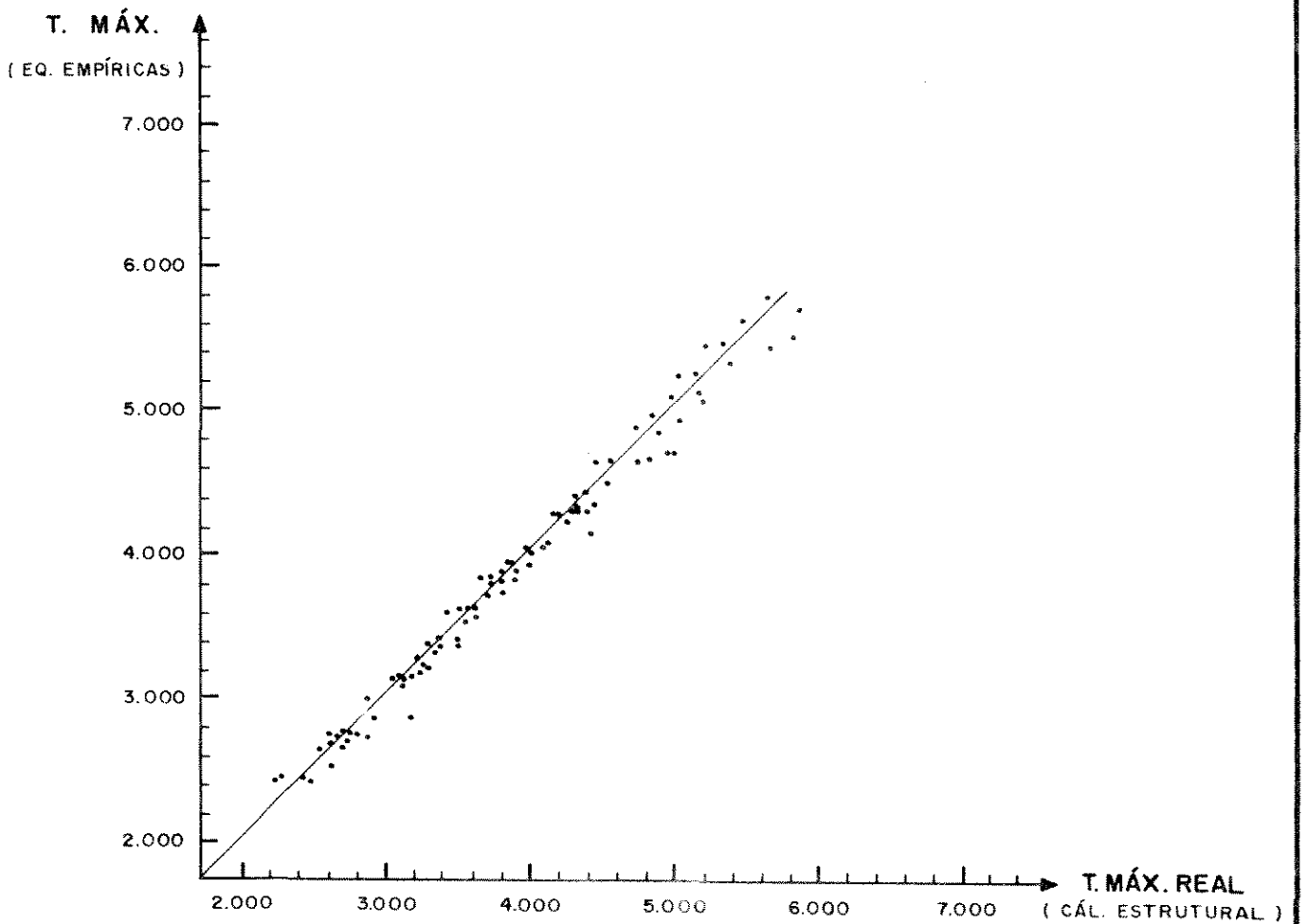


Figura 5.3.2. — Gráfico de tensões máximas na barra 2 (N/cm^2).

Usando simplificar os modelos empíricos de tensões máximas foram identificadas e eliminadas as variáveis com baixa significância na determinação de TMAX.

Uma vez excluídas as variáveis pouco significativas efetuou-se a análise de regressão das demais. Os parâmetros estimados estão apresentados na Tabela 5.3.3 tomando-se como nulos (zero) os parâmetros das variáveis com baixa significância.

Substituindo-os na equação genérica (5.1) chega-se ao modelo simplificado da equação.

| Parâmetro | Barra1 | Barra2 | Barra3 | Barra4 | Barra5 | Barra6 | Barra7 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B0 | 260,51 | 322,34 | 146,75 | 495,05 | 394,52 | 201,88 | 443,89 |
| B1 | -38,11 | -32,63 | -13,16 | 0,00 | 0,00 | 10,22 | - 3,24 |
| B2 | -24,18 | -28,48 | -13,94 | - 5,52 | 0,00 | 14,64 | 14,41 |
| B3 | - 3,41 | 0,00 | -15,44 | -63,97 | -60,86 | -20,84 | -45,11 |
| B4 | 0,00 | -24,78 | 16,19 | -10,06 | - 8,33 | -11,19 | - 8,12 |
| B5 | -11,48 | -18,98 | - 2,74 | -34,45 | 0,00 | - 8,30 | 20,53 |
| B6 | -46,45 | -56,60 | - 9,60 | -17,05 | - 1,88 | -14,94 | -24,76 |
| B7 | - 1,57 | 0,00 | - 6,14 | -32,28 | -27,21 | - 8,05 | -21,43 |
| B8 | 3,11 | 8,17 | 6,68 | 0,00 | 0,00 | - 4,46 | 0,00 |
| B9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B10 | 0,00 | 0,00 | - 6,58 | 0,00 | 0,00 | - 5,61 | 0,00 |
| B11 | 2,97 | 3,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| | | | | | | | |
|-----|------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| B12 | 5,76 | 4,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,60 | 0,00 |
| B15 | 0,00 | 4,16 | 3,64 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B16 | 5,92 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B17 | 4,89 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - 3,54 |
| B18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B19 | 0,00 | 0,00 | - 5,96 | 2,34 | 2,01 | 2,28 | 0,00 |
| B20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,13 | 0,00 | 1,67 | 4,62 |
| B21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,02 | 0,00 | 1,70 | 5,47 |
| B22 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,42 | 0,00 | 0,00 |
| B23 | 0,00 | 3,66 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - 2,54 |
| B24 | 0,00 | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,52 | 2,13 | 0,00 | 0,00 |
| B26 | 3,10 | 0,00 | 0,00 | - 1,93 | 0,00 | 0,00 | - 7,43 |
| B27 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B28 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B29 | 5,10 | 11,32 | 0,00 | 9,83 | 6,03 | 0,00 | 5,15 |
| B30 | 4,21 | 5,00 | - 8,21 | 11,76 | 5,76 | 0,00 | 0,00 |
| B31 | 0,00 | 7,82 | 0,00 | 16,78 | 15,57 | 0,00 | 9,63 |
| B32 | 0,00 | 9,70 | 0,00 | 10,16 | 5,34 | 0,00 | 5,52 |
| B33 | 0,00 | 6,60 | 0,00 | 11,64 | 5,71 | - 2,63 | - 5,16 |
| B34 | 3,14 | 15,49 | 9,71 | 11,91 | 4,08 | - 6,23 | 4,16 |
| B35 | 1,80 | 7,06 | 2,85 | 11,44 | 8,17 | 1,91 | 7,55 |

Tabela 5.3.3 - Parâmetros estimados para a equação de regressão, modelo simplificado.

Da avaliação dos parâmetros estatísticos apresentados nas Tabelas 5.3.2 e 5.3.4, verificou-se que o grau de dispersão (S) das equações é, em média, 4% maior e o coeficiente de correlação 3% menor no modelo simplificado em relação ao modelo completo.

| Parâmetro | Barra1 | Barra2 | Barra3 | Barra4 | Barra5 | Barra6 | Barra7 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S | 5,55 | 15,10 | 11,50 | 8,63 | 8,08 | 7,63 | 10,23 |
| R | 93,40 | 96,90 | 91,80 | 99,10 | 98,80 | 96,20 | 97,80 |
| Rx | 99,30 | 96,50 | 90,80 | 99,00 | 98,60 | 95,80 | 97,50 |

Tabela 5.3.4 - Dados da avaliação estatística das equações empíricas de tensão máxima (TMAX)_i, modelo simplificado.

O modelo completo da equação permite determinar a tensão máxima em cada barra da estrutura com uma aproximação de 95% do valor real, enquanto que o modelo simplificado alcança 94,3%.

De um total de trinta e cinco (35) parâmetros no modelo completo fica reduzido a quatorze (14) na barra 5, quinze (15) na barra 3, dezesseis (16) nas barras 1 e 6, dezessete (17) na barra 2 dezoito (18) na barra 7 e dezenove (19) na barra 4.

O desvio máximo observado foi de 50,34 kg/cm² que, para uma tensão de escoamento de 2800 kg/cm² representa 1,5% de erro, o

qual é observado dentro dos níveis de coeficiente de segurança, da ordem de quatro (4), usado no dimensionamento, visando absorver os picos de carga dinâmica a que é submetido qualquer implemento de preparo do solo de baixa velocidade.

O projetista, para obter uma estrutura otimizada, deve variar os valores atribuídos às variáveis dimensionais da seção A1 a A7, até obter tensões máximas nas barras iguais à tensão admissível do material considerado no projeto ou muito próximo deste.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas discussões apresentadas no capítulo anterior chegou-se às seguintes conclusões:

- 6.1 - Em diversas máquinas agrícolas, como arados, grades, semeadoras, cultivadores e colheitadoras, as estruturas têm atingido configurações geométricas muito similares entre modelos de diferentes fabricantes, permitindo uma padronização das mesmas, de modo que os componentes de maior responsabilidade na transferência de cargas da máquina ao solo ou ao engate podem ser orientados espacialmente sem maiores ambiguidades.
- 6.2 - O cálculo dos esforços nas barras da estrutura portante espacial de uma máquina agrícola, pelos métodos convencionais para sistemas hiperestáticos, executados manualmente ou em computador digital, resulta inacessível ou impraticável para o projetista de pequenas e médias empresas fabricantes de máquinas ou implementos agrícolas.
- 6.3 - As barras de uma estrutura podem ser caracterizadas por um número limitado de variáveis estruturais, como largura e espessura, permitindo que possam ser obtidas, através do pro-

caso apresentado, equações que vinculem tensões nas barras às variáveis da estrutura requerendo, basicamente, um programa de cálculo estrutural, como o listado no Apêndice A, e outro para estimação de parâmetros.

6.4 - Pela facilidade no manuseio e aceitável precisão, recomenda-se a utilização das equações simplificadas especialmente nas primeiras aproximações das tensões máximas do processo de dimensionamento à tensão admissível do material adotado para o projeto.

6.5 - O modelo matemático determinado para as equações empíricas de tensões máximas na estrutura do arado de três discos descreve, com desvios inferiores a 8%, os fenômenos envolvidos no processo de cálculo estrutural.

6.6 - Os arados devem ser dimensionados considerando uma situação de trabalho em que a roda guia não ofereça apoio, o que determina um aumento nas tensões de todas as barras.

6.7 - As equações de tensões máximas geradas para arado são suficientemente simples para serem resolvidas em qualquer calculadora portátil.

6.8 - As seções obtidas para tensões próximas de 5000 N/cm², são significativamente menores do que as observadas normalmente em arados comerciais, indicando que os coeficientes de segurança empregados são várias vezes superiores ao fator 4 considerado neste estudo.

CAPÍTULO 7

7. SUGESTÕES

Tendo em vista os propósitos e as conclusões obtidas do presente trabalho, bem como a experiência adquirida, as seguintes sugestões são apresentadas:

- 7.1 - Implementar estudos utilizando a metodologia desenvolvida no presente trabalho, para a geração de equações de tensões máximas para os demais tipos e modelos de arados e, também, para as demais máquinas agrícolas.
- 7.2 - Estabelecer uma linha de pesquisa baseada na análise da estrutura das máquinas agrícolas existentes no mercado e, a partir dos estudos realizados, promover a apresentação de propostas para modificações das estruturas e encaminhar o desenvolvimento de outras não convencionais.
- 7.3 - Considerando a simplicidade das equações empíricas obtidas, sugerimos a incorporação de maior número de variáveis da estrutura visando dar maior flexibilidade ao projetista, sabendo que o processo de estimação de parâmetros não se tornaria inviável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo de Estruturas de Aço, Constituídas por Perfis Leves, P-NB-143, 1967.
- [2] - BAIGER, R.; REPNER, R.A.; BARGER, E. - Engineering Elements of Farm Machinery, California, 1953.
- [3] - BARGER, E.L.; LILJEDAHN, J.B.; CARLETON, W.M.; MCKIBBEN, E.
Tratores e seus Motores, Editora Edgard Blücher, São Paulo, S.P., 1963.
- [4] - BEEB, F.; JOHNSTON, E. - Resistência dos Materiais, Mcgraw-Hill do Brasil, São Paulo, S.P., 1982.
- [5] - BERLIND, J.D. - Manuales para Educacion Agropecuaria, Editorial Trillas, México, 1982.
- [6] - BERDACK, H.; HAMAN, J.; KANAFOJSKI, C. - Agricultural Machines. Theory and Construction, Scientific Publications Foreign Cooperation Center, Warsaw, Poland, 1972.
- [7] - FOX, G.S.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. - Statistics for Experimenters, John Wiley and Sons, New York, 1978.
- [8] - GONZALEZ, J. - Las Máquinas Agrícolas, Editora Mundi-Prensa Nequi, Espanha, 1980.

- E101 - FERREIRA, J.R.; MORAFES, P.L. - Órgãos de Máquinas, Livros Técnicos e Científicos Editora, 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 1978.
- E103 - CLYDE, A.W. - Improvement of Disk Tools, Agricultural Engineering, Volume 20, Junho, 1939.
- E111 - DAYABATHAN, P. - Advanced Structural Analysis, Tata McGraw-Hill Publishing Co., New Delhi, 1979.
-
- E123 - GEAR, J.H., and WEAVER, W.Jr. - Analysis of Framed Structures, Van Nostrand Reinhold, New York, 1965.
- E131 - GORDON, E.D. - Physical Reactions of Soils on Plow Disks, Agricultural Engineering, Volume 22, pg.205-208, Junho, 1941.
- E141 - HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. - Análise de Regressão, Editora da Universidade de São Paulo, S.P., 1977.
- E153 - NATALHE, L.G. - Máquinas Motoras na Agricultura, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P., 1980.
- E163 - MINITAB, Pacote Estatístico da Universidade da Pensilvania, USA.
- E171 - ODEW, J. - Mechanics of Elastic Structures, McGraw-Hill Book Company New York, 1967.

- E183 - REED, T.F. - Disk and their Operation, USDA Farmers' Bull., 1948.
- E193 - RICARDO, O.G. - Introdução à Resistência dos Materiais, Editora da Universidade de Campinas, Campinas, S.P., 1982.
- E201 - REEF, G.; YACOBSON, P.; HALL, C. - Agricultural Engineering Handbook, Mcraw-Hill Book Company, New York, 1961.
- E213 - SAAD, O. & BOUCHE, C.; LEITNER, A. - Manual do Engenheiro Mecânico, Editora Hemus, São Paulo, S.P., 1979.
- E221 - SERBELINO, L. - Finite Elements and the Agricultural Engineer Agricultural Engineering, Volume 56, n.6 pg. 14-16, 1975.
- E231 - SOUZA, A.; GUIMARÃES, J.; SAAD, O. - Efeito da Velocidade de Operação do Arado de Discos, na Componente Longitudinal do Esforço Traatório, em Solo de Classe Textural Argila. Trabalho apresentado no IV Congresso Nacional de Engenharia Agrícola Uíçosa, MG
- E243 - THOSHENKO, S.P.; GODIER, J.N. - Teoria da Elasticidade, 3ª Edição, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, R.J., 1980.
- E253 - TUMI, J.J. Structural Analysis, Mcraw-Hill Book Company, New York, N.Y., 1969.

[263] - VANDERBILT, D. - Matrix Structural Analysis, Editora Quantum
Publishing Inc, New York, N.Y., 1974.

[273] - WALKER, A.C. - Design and Analysis of Cold-Formed Sections,
Editora John Wiley and Sons, New York, 1975.

[283] - WEAVER, W.J. Computer Programs for Structural Analysis, Van
Nostrand Company, Toronto, Canada, 1967.

[293] - WILLENS, N.; EASLEY, J.; ROLFE, S. - Resistência dos Materi-
ais. Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, S.P., 1982.

A P Ê N D I C E A

```

15 PRINT "*****"
20 PRINT "ANÁLISE DE PÓRTICO ESPACIAL**"
23 PRINT "*****"
30 READ M,N,NR,RJ,E,G,PE
35 PRINT " DADOS DA ESTRUTRA "
40 DATA          7,5,6,3,2100000,805000,.008
42 N = 6 * NJ + NR
.....43.....REM.....RESERVA DE MEMÓRIA PARA ARMAZENAGEM DAS VARIÁVEIS SUBS.....
.....CPITAS....."
45 DIM RL(6 * NJ),CRL(6 * NJ),MR(12,12),SM(12,12),S(6 * NJ,6 * N
J),MD(12,12),AML(12,12),DT(N),DD(N),AE(6 * NJ),A(6 * NJ),R(12,12)
,AC(6 * NJ),AR(6 * NJ),D(6 * NJ),MSR(12,12)
60 PRINT " NÚMERO DE BARRAS (M) = ";M: PRINT " NÚMERO DE GRAUS D
E LIBERDADE (H) = ";H
70 PRINT " NÚMERO DE NÓS      (NJ) = ";NJ: PRINT " MÓDULO DE ELAST
IC. LONGITUD. (E) =;E
80 PRINT " NÚMERO DE RESTRIÇÕES (NR)= ";NR: PRINT " MÓDULO DE EL
ASTIC. TRANSVERS. (G) =;G
90 PRINT " NÚMERO DE NÓS RESTRITOS (RJ)=";RJ: PRINT " PESO ESPEC
IFICO DO MATERIAL (PE) = "PE
100 PRINT TAB(10)" COORDEHADAS DOS NÓS "
110 PRINT TAB(3)" NO"      X          Y          Z "
140 FOR J = 1 TO NJ
150 READ X(J),Y(J),Z(J)

```



```

160 DATA 0,0,0,0,46,41.3,0,0,82.4,43,0,41.3,125,0,82.6
170 PRINT TAB(3)X(J),Y(J),Z(J)
180 NEXT J
190 PRINT " DESIGNAÇÕES, PROPRIEDADES E ORIENTAÇÕES DAS BARRAS
"
195 PRINT " BARRA JJ JK AX IX IY IZ AA L CX CY CZ
Z "
200 FOR I = 1 TO M
205 GOSUB 10000 REM " SUBPROGRAMA VARIA SEÇÃO."
210 READ JJ(I),JK(I),AA(I)
220 DATA 1,3,0,1,2,0,2,3,0,1,4,0,4,5,0,3,5,0,2,4,0
245 AX(I) = (A * B - C * D):IY(I) = (B * A ^ 3 - D * C ^ 3) / 12
250 IZ(I) = (A * B ^ 3 - C * D ^ 3) / 12:IX(I) = 2 * (A - T) ^ 2 *
(B - T) ^ 2 * T / (A + B - 2 * T)
255 XCL = X(JK(I)) - X(JJ(I)):YCL = Y(JK(I)) - Y(JJ(I)):ZCL = Z(J
K(I)) - Z(JJ(I))
260 L(I) = SQR (XCL ^ 2 + YCL ^ 2 + ZCL ^ 2)
270 CX = XCL / L(I):CY = YCL / L(I):CZ = ZCL / L(I)
280 PRINT I, JJ(I), JK(I), AX(I), IX(I), IY(I), IZ(I), AA(I), L(I), CX, CY
,CZ
300 0 = SQR (CX ^ 2 + CZ ^ 2)
310 IF AA(I) = 1 THEN GOSUB 3000
350 IF 0 > 0.001 THEN 410
360 R(I,2) = CY:R(I,4) = - CY:R(I,9) = 1
370 IF AA(I) > 1 THEN 490

```

```

380 SQ = SQ0 (XSP ^ 2 + ZSP ^ 2): COS (A) = - XSP * CY / SQ: SIN
(A) = ZSP / SQ:R(I,4) = - CY * COS (A):R(I,6) = SIN (A):R(I,7)
= CY * SIN (A):R(I,9) = COS (A): GOTO 490
410 R(I,1) = CX:R(I,2) = CY:R(I,3) = CZ:R(I,4) = - CX * CY / Q:R
(I,5) = Q:R(I,6) = - CY * CZ / Q:R(I,7) = - CZ / Q:R(I,8) = 0.0
:R(I,9) = CX / Q
420 IF AA(I) ( ) 1 THEN 490
430 YGP = R(I,4) * XSP + R(I,5) * YSP + R(I,6) * ZSP
440 ZGP = R(I,7) * XSP + R(I,8) * YSP + R(I,9) * ZSP
450 SQ = SQ0 (YGP ^ 2 + ZGP ^ 2)
460 COS (A) = YGP / SQ: SIN (A) = ZGP / SQ
470 R(I,4) = (- CX * CY * COS (A) - CZ * SIN (A)) / Q:R(I,5) =
Q * COS (A)
480 R(I,6) = (- CY * CZ * COS (A) + CX * SIN (A)) / Q:R(I,7) =
(CX * CY * SIN (A) - CZ * COS (A)) / Q:R(I,8) = - Q * SIN (A)
:R(I,9) = (CY * CZ * SIN (A) + CX * COS (A)) / Q
490 NEXT I
491 A = 0:B = 0:C = 0:D = 0: REM " ZERA-SE AS VARIÁVEIS DA SEÇÃO
PORQUE ESTÃO EM UMA ITERAÇÃO PARA I BARRAS."
510 FOR J = 1 TO RJ
515 DATA 1,1,1,0,0,0,0,2,1,0,0,0,0,0,3,1,1,1,0,0,0
520 READ K
522 K1 = 6 * K - 5:K2 = 6 * K - 4:K3 = 6 * K - 3:K4 = 6 * K - 2:K
5 = 6 * K - 1:K6 = 6 * K
524 READ RL(K1),RL(K2),RL(K3),RL(K4),RL(K5),RL(K6)
550 NEXT J

```

```

560 CRL(I) = J1(I)
570 FOR K = 2 TO 6 * NJ
580 CRL(K) = CRL(K - 1) + RL(K)
590 NEXT K
600 REM *** GERAÇÃO DA MATRIZ DE RIGIDEZ***
610 FOR I = 1 TO M
620 J1 = 6 * JJ(I) - 5:J2 = 6 * JJ(I) - 4:J3 = 6 * JJ(I) - 3:J4 =
6 * JJ(I) - 2:J5 = 6 * JJ(I) - 1:J6 = 6 * JJ(I)
630 K1 = 6 * JK(I) - 5:K2 = 6 * JK(I) - 4:K3 = 6 * JK(I) - 3:K4 =
6 * JK(I) - 2:K5 = 6 * JK(I) - 1:K6 = 6 * JK(I)
640 M1 = (E * AX(I)) / L(I):M5 = (G * IX(I)) / L(I):M2 = (4 * E *
IY(I)) / L(I):M3 = (1.5 * M2) / L(I):M4 = (2 * M3) / L(I):Z2 = (4
* E * IZ(I)) / L(I)
650 Z3 = (1.5 * Z2) / L(I):Z4 = (2.0 * Z3) / L(I)
660 IF RL(J1) = 0 THEN J1 = J1 - CRL(J1): GOTO 670
665 IF RL(J1) < 0 THEN J1 = N + CRL(J1)
670 IF RL(J2) = 0 THEN J2 = J2 - CRL(J2): GOTO 680
675 IF RL(J2) < 0 THEN J2 = N + CRL(J2)
680 IF RL(J3) = 0 THEN J3 = J3 - CRL(J3): GOTO 690
685 IF RL(J3) < 0 THEN J3 = N + CRL(J3)
690 IF RL(J4) = 0 THEN J4 = J4 - CRL(J4): GOTO 700
695 IF RL(J4) < 0 THEN J4 = N + CRL(J4):
700 IF RL(J5) = 0 THEN J5 = J5 - CRL(J5): GOTO 710
705 IF RL(J5) < 0 THEN J5 = N + CRL(J5)
710 IF RL(J6) = 0 THEN J6 = J6 - CRL(J6): GOTO 720
715 IF RL(J6) < 0 THEN J6 = N + CRL(J6)

```

```

720 IF RL(K1) = 0 THEN K1 = K1 - CRL(K1): GOTO 730
725 IF RL(K1) < > 0 THEN K1 = N + CRL(K1)
730 IF RL(K2) = 0 THEN K2 = K2 - CRL(K2): GOTO 740
735 IF RL(K2) < > 0 THEN K2 = N + CRL(K2)
740 IF RL(K3) = 0 THEN K3 = K3 - CRL(K3): GOTO 750
745 IF RL(K3) < > 0 THEN K3 = N + CRL(K3)
750 IF RL(K4) = 0 THEN K4 = K4 - CRL(K4): GOTO 760
755 IF RL(K4) < > 0 THEN K4 = N + CRL(K4)
760 IF RL(K5) = 0 THEN K5 = K5 - CRL(K5): GOTO 770
765 IF RL(K5) < > 0 THEN K5 = N + CRL(K5):
770 IF RL(K6) = 0 THEN K6 = K6 - CRL(K6): GOTO 780
775 IF RL(K6) < > 0 THEN K6 = N + CRL(K6)
780 GOSUB 8000: REM SUBPROGRAMA "MATRIZ DE RIGIDEZ"
800 FOR K = 1 TO 4
810 FOR J = 1 TO 12
820 MR(J,3 * K + 2) = SM(J,3 * K + 2) * R(I,1) + SM(J,3 * K + 1) *
R(I,4) + SM(J,3 * K) * R(I,7)
830 MR(J,3 * K + 1) = SM(J,3 * K + 2) * R(I,2) + SM(J,3 * K + 1) *
R(I,5) + SM(J,3 * K) * R(I,8)
840 MR(J,3 * K) = SM(J,3 * K + 2) * R(I,3) + SM(J,3 * K + 1) * R(
I,6) + SM(J,3 * K) * R(I,9)
850 NEXT J: NEXT K
870 FOR J = 1 TO 4
880 FOR K = 1 TO 12

```

```

890 MD(3 * J - 2,K) = R(I,1) * MR(3 * J - 2,K) + R(I,4) * MR(3 *
J - 1,K) + R(I,7) * MR(3 * J,K):MD(3 * J - 1,K) = R(I,2) * MR(3 *
J - 2,K) + R(I,5) * MR(3 * J - 1,K) + R(I,8) * MR(3 * J,K):MD(3 *
J,K) = R(I,3) * MR(3 * J - 2,K) + R(I,6) * MR(3 * J - 1,K) + R(I,
9) * MR(3 * J,K)

```

```

892 NEXT K: NEXT J

```

```

895 IF RL(6 * JJ(I) - 5) < > 0 THEN 920

```

```

900 S(J1,J1) = S(J1,J1) + MD(1,1):S(J2,J1) = S(J2,J1) + MD(2,1):S
(J3,J1) = S(J3,J1) + MD(3,1):S(J4,J1) = S(J4,J1) + MD(4,1):S(J5,J
1) = S(J5,J1) + MD(5,1):S(J6,J1) = S(J6,J1) + MD(6,1):S(K1,J1) =

```

```

MD(7,1):S(K2,J1) = MD(8,1):S(K3,J1) = MD(9,1)

```

```

910 S(K4,J1) = MD(10,1):S(K5,J1) = MD(11,1):S(K6,J1) = MD(12,1)

```

```

920 IF RL(6 * JJ(I) - 4) < > 0 THEN 950

```

```

930 S(J1,J2) = S(J1,J2) + MD(1,2):S(J2,J2) = S(J2,J2) + MD(2,2)

```

```

940 S(J3,J2) = S(J3,J2) + MD(3,2):S(J4,J2) = S(J4,J2) + MD(4,2):S
(J5,J2) = S(J5,J2) + MD(5,2):S(J6,J2) = S(J6,J2) + MD(6,2):S(K1,J
2) = MD(7,2):S(K2,J2) = MD(8,2):S(K3,J2) = MD(9,2):S(K4,J2) = MD(
10,2):S(K5,J2) = MD(11,2):S(K6,J2) = MD(12,2)

```

```

950 IF RL(6 * JJ(I) - 3) < > 0 THEN 980

```

```

960 S(J1,J3) = S(J1,J3) + MD(1,3):S(J2,J3) = S(J2,J3) + MD(2,3)

```

```

970 S(J3,J3) = S(J3,J3) + MD(3,3):S(J4,J3) = S(J4,J3) + MD(4,3):S
(J5,J3) = S(J5,J3) + MD(5,3):S(J6,J3) = S(J6,J3) + MD(6,3):S(K1,J
3) = MD(7,3)

```

```

975 S(K2,J3) = MD(8,3):S(K3,J3) = MD(9,3):S(K4,J3) = MD(10,3):S(K
5,J3) = MD(11,3):S(K6,J3) = MD(12,3)

```

```

980 IF RL(6 * JJ(I) - 2) < > 0 THEN 1010

```

```

990 S(J1,J4) = S(J1,J4) + MD(1,4)*S(J2,J4) = S(J2,J4) + MD(2,4)
1000 S(J3,J4) = S(J3,J4) + MD(3,4)*S(J4,J4) = S(J4,J4) + MD(4,4)*
S(J5,J4) = S(J5,J4) + MD(5,4)*S(J6,J4) = S(J6,J4) + MD(6,4)*S(K1,
J4) = MD(7,4)*S(K2,J4) = MD(8,4)*S(K3,J4) = MD(9,4)*S(K4,J4) = MD
(10,4)*S(K5,J4) = MD(11,4)*S(K6,J4) = MD(12,4)
1010 IF RL(6 * JJ(I) - 1) < > 0 THEN 1040
1020 S(J1,J5) = S(J1,J5) + MD(1,5)*S(J2,J5) = S(J2,J5) + MD(2,5)
1030 S(J3,J5) = S(J3,J5) + MD(3,5)*S(J4,J5) = S(J4,J5) + MD(4,5)*
S(J5,J5) = S(J5,J5) + MD(5,5)*S(J6,J5) = S(J6,J5) + MD(6,5)*S(K1,
J5) = MD(7,5)*S(K2,J5) = MD(8,5)*S(K3,J5) = MD(9,5)*S(K4,J5) = MD
(10,5)*S(K5,J5) = MD(11,5)*S(K6,J5) = MD(12,5)
-----
1040 IF RL(6 * JJ(I)) < > 0 THEN 1070
1050 S(J1,J6) = S(J1,J6) + MD(1,6)*S(J2,J6) = S(J2,J6) + MD(2,6)
1060 S(J3,J6) = S(J3,J6) + MD(3,6)*S(J4,J6) = S(J4,J6) + MD(4,6)*
S(J5,J6) = S(J5,J6) + MD(5,6)*S(J6,J6) = S(J6,J6) + MD(6,6)*S(K1,
J6) = MD(7,6)*S(K2,J6) = MD(8,6)*S(K3,J6) = MD(9,6)*S(K4,J6) = MD
(10,6)*S(K5,J6) = MD(11,6)*S(K6,J6) = MD(12,6)
1070 IF RL(6 * JK(I) - 5) < > 0 THEN 1100
1080 S(J1,K1) = MD(1,7)*S(J2,K1) = MD(2,7)*S(J3,K1) = MD(3,7)*S(J
4,K1) = MD(4,7)*S(J5,K1) = MD(5,7)*S(J6,K1) = MD(6,7)*S(K1,K1) =
S(K1,K1) + MD(7,7)*S(K2,K1) = S(K2,K1) + MD(8,7)*S(K3,K1) = S(K3,
K1) + MD(9,7)*S(K4,K1) = S(K4,K1) + MD(10,7)
1090 S(K5,K1) = S(K5,K1) + MD(11,7)*S(K6,K1) = S(K6,K1) + MD(12,7
)
1100 IF RL(6 * JK(I) - 4) < > 0 THEN 1130

```

1110 S(J1,K2) = MD(1,8):S(J2,K2) = MD(2,8):S(J3,K2) = MD(3,8):S(J
 4,K2) = MD(4,8):S(J5,K2) = MD(5,8):S(J6,K2) = MD(6,8):S(K1,K2) =
 S(K1,K2) + MD(7,8):S(K2,K2) = S(K2,K2) + MD(8,8):S(K3,K2) = S(K3,
 K2) + MD(9,8):S(K4,K2) = S(K4,K2) + MD(10,8)

1120 S(K5,K2) = S(K5,K2) + MD(11,8):S(K6,K2) = S(K6,K2) + MD(12,8
)

1130 IF RL(6 * JK(I) - 3) < > 0 THEN 1160

1140 S(J1,K3) = MD(1,9):S(J2,K3) = MD(2,9):S(J3,K3) = MD(3,9):S(J
 4,K3) = MD(4,9):S(J5,K3) = MD(5,9):S(J6,K3) = MD(6,9):S(K1,K3) =
 S(K1,K3) + MD(7,9):S(K2,K3) = S(K2,K3) + MD(8,9):S(K3,K3) = S(K3,
 K3) + MD(9,9):S(K4,K3) = S(K4,K3) + MD(10,9)

1150 S(K5,K3) = S(K5,K3) + MD(11,9):S(K6,K3) = S(K6,K3) + MD(12,9
)

1160 IF RL(6 * JK(I) - 2) < > 0 THEN 1190

1170 S(J1,K4) = MD(1,10):S(J2,K4) = MD(2,10):S(J3,K4) = MD(3,10):
 S(J4,K4) = MD(4,10):S(J5,K4) = MD(5,10):S(J6,K4) = MD(6,10):S(K1,
 K4) = S(K1,K4) + MD(7,10):S(K2,K4) = S(K2,K4) + MD(8,10):S(K3,K4)
 = S(K3,K4) + MD(9,10):S(K4,K4) = S(K4,K4) + MD(10,10)

1180 S(K5,K4) = S(K5,K4) + MD(11,10):S(K6,K4) = S(K6,K4) + MD(12,
 10)

1190 IF RL(6 * JK(I) - 1) < > 0 THEN 1220

1200 S(J1,K5) = MD(1,11):S(J2,K5) = MD(2,11):S(J3,K5) = MD(3,11):
 S(J4,K5) = MD(4,11):S(J5,K5) = MD(5,11):S(J6,K5) = MD(6,11):S(K1,
 K5) = S(K1,K5) + MD(7,11):S(K2,K5) = S(K2,K5) + MD(8,11):S(K3,K5)
 = S(K3,K5) + MD(9,11):S(K4,K5) = S(K4,K5) + MD(10,11)

1210 S(K5,K5) = S(K5,K5) + MD(11,11):S(K6,K5) = S(K6,K5) + MD(12,
 11)

```

1220 IF RL(6 * JK(I)) ( ) = 0 THEN 1250
1230 S(J1,K6) = MD(1,12):S(J2,K6) = MD(2,12):S(J3,K6) = MD(3,12):
S(J4,K6) = MD(4,12):S(J5,K6) = MD(5,12):S(J6,K6) = MD(6,12):S(K1,
K6) = S(K1,K6) + MD(7,12):S(K2,K6) = S(K2,K6) + MD(8,12):S(K3,K6)
= S(K3,K6) + MD(9,12):S(K4,K6) = S(K4,K6) + MD(10,12)
1240 S(K5,K6) = S(K5,K6) + MD(11,12):S(K6,K6) = S(K6,K6) + MD(12,
12)
1250 NEXT I
1260 GOSUB 8000: REM SUBPROGRAMA INVERTE MATRIZ
1490 REM *** DADOS DE CARGAS***
.....
1500 READ NLJ,NML
1510 DATA 1,2
1540 IF NLJ = 0 THEN 1600
1550 REM *** ACOES APLICADAS NOS NÓS EM RELAÇÃO A COORDENADAS D
A ESTRUTURA***
1560 FOR J = 1 TO NLJ
1562 DATA 4,204,-101,100,-4167,1930,12752
1564 READ K
1565 K1 = 6 * K - 5:K2 = 6 * K - 4:K3 = 6 * K - 3:K4 = 6 * K - 2:
K5 = 6 * K - 1:K6 = 6 * K
1567 READ A(K1),A(K2),A(K3),A(K4),A(K5),A(K6)
1590 NEXT J
1600 IF NML = 0 THEN 1840
1610 REM ***AÇÕES NAS EXTREMIDADES DAS BARRAS ***
1620 FOR J = 1 TO NML
1623 READ I,RX,RY,RZ,MX,MY,MZ,L1,L2

```



```

1625 DATA 4.171,-101.84,-3485,1630,10664,15,60.33,5
,171,-101,84,-3485,1930,10664,60.33,15
1630 AML(I,1) = -RX * L2 / L(I):AML(I,2) = -RY * L2 ^ 2 / L(I)
) ^ 3 * (3 * L1 + L2) + 6 * MZ * L1 * L2 / L(I) ^ 3:AML(I,3) = -
RZ * L2 ^ 2 / L(I) ^ 3 * (3 * L1 + L2) - 6 * MY * L1 * L2 / L(I) ^
3
1635 AML(I,6) = MZ * L2 * (2 * L1 - L2) / L(I) ^ 2 - RY * L1 * L2
^ 2 / L(I) ^ 2
1640 AML(I,4) = -MX * L2 / L(I):AML(I,5) = MY * L2 * (2 * L1 -
L2) / L(I) ^ 2 + RZ * L2 ^ 2 * L1 / L(I) ^ 2
.....
1641 AML(I,7) = -RX * L1 / L(I):AML(I,8) = -RY * L1 ^ 2 / L(I)
) ^ 3 * (L1 + 3 * L2) - 6 * MZ * L1 * L2 / L(I) ^ 3
1642 AML(I,10) = -MX * L1 / L(I):AML(I,11) = MY * L1 * (2 * L2 -
L1) / L(I) ^ 2 - RZ * L1 ^ 2 * L2 / L(I) ^ 2
1643 AML(I,9) = -RZ * L1 ^ 2 / L(I) ^ 3 * (L1 + 3 * L2) + 6 * M
Y * L1 * L2 / L(I) ^ 3:AML(I,12) = MZ * L1 * (2 * L2 - L1) / L(I)
^ 2 + RY * L1 ^ 2 * L2 / L(I) ^ 2
1660 NEXT J
1666 GOSUB 5000: REM SUBPROGRAMA PESO PRÓPRIO - USE-O SEMPRE
QUE DESEJAR CONSIDERAR O PESO PRÓPRIO NA ANÁLISE -
1670 REM ***CONSTRUÇÃO DE VETORES ASSOCIADOS COM CARGAS ***
1690 IF NML = 0 THEN 1840
1700 FOR I = 1 TO M
1710 AE(6 * JJ(I) - 5) = AE(6 * JJ(I) - 5) - R(I,1) * AML(I,1) -
R(I,4) * AML(I,2) - R(I,7) * AML(I,3)
1720 AE(6 * JJ(I) - 4) = AE(6 * JJ(I) - 4) - R(I,2) * AML(I,1) -
R(I,5) * AML(I,2) - R(I,8) * AML(I,3)

```

```

1730 AE(6 * II(I) - 3) = AE(6 * JJ(I) - 3) - R(I,3) * AML(I,1) -
R(I,6) * AML(I,2) - R(I,9) * AML(I,3)
1740 AE(6 * JJ(I) - 2) = AE(6 * JJ(I) - 2) - R(I,1) * AML(I,4) -
R(I,4) * AML(I,5) - R(I,7) * AML(I,6)
1750 AE(6 * JJ(I) - 1) = AE(6 * JJ(I) - 1) - R(I,2) * AML(I,4) -
R(I,5) * AML(I,5) - R(I,8) * AML(I,6)
1760 AE(6 * JJ(I)) = AE(6 * JJ(I)) - R(I,3) * AML(I,4) - R(I,6) *
AML(I,5) - R(I,9) * AML(I,6)
1770 AE(6 * JK(I) - 5) = AE(6 * JK(I) - 5) - R(I,1) * AML(I,7) -
R(I,4) * AML(I,8) - R(I,7) * AML(I,9)
1780 AE(6 * JK(I) - 4) = AE(6 * JK(I) - 4) - R(I,2) * AML(I,7) -
R(I,5) * AML(I,8) - R(I,8) * AML(I,9)
1790 AE(6 * JK(I) - 3) = AE(6 * JK(I) - 3) - R(I,3) * AML(I,7) -
R(I,6) * AML(I,8) - R(I,9) * AML(I,9)
1800 AE(6 * JK(I) - 2) = AE(6 * JK(I) - 2) - R(I,1) * AML(I,10) -
R(I,4) * AML(I,11) - R(I,7) * AML(I,12)
1810 AE(6 * JK(I) - 1) = AE(6 * JK(I) - 1) - R(I,2) * AML(I,10) -
R(I,5) * AML(I,11) - R(I,8) * AML(I,12)
1820 AE(6 * JK(I)) = AE(6 * JK(I)) - R(I,3) * AML(I,10) - R(I,6) *
AML(I,11) - R(I,9) * AML(I,12)
1830 NEXT I
1840 REM *** CARGAS NODAIS COMBINADAS ***
1850 FOR J = 1 TO N + NR
1860 IF RL(J) = 0 THEN K = J - CRL(J)
1865 IF RL(J) < > 0 THEN K = N + CRL(J)
1870 AC(K) = A(J) + AE(J)
1880 NEXT J

```

```

1890  REM *** CÁLCULO E SAIDA DOS RESULTADOS ***
1960  FOR J = 1 TO N
1970  FOR K = 1 TO N
1980  D(J) = D(J) + S(J,K) * AC(K)
1990  NEXT K: NEXT J
2000  FOR K = N + 1 TO N + NR
2010  AR(K) = - AC(K)
2020  FOR J = 1 TO N
2030  AR(K) = AR(K) + S(K,J) * D(J)
2040  NEXT J: NEXT K
.....
2050  J = N + 1
2060  FOR JE = N + NR TO 1 STEP - 1
2065  IF RL(JE) < > 0 THEN D(JE) = 0
2070  IF RL(JE) = 0 THEN J = J - 1: D(JE) = D(J)
2080  NEXT JE
2090  K = N
2100  FOR KE = 1 TO N + NR
2110  IF RL(KE) = 1 THEN K = K + 1: AR(KE) = AR(K)
2115  IF RL(KE) < > 1 THEN AR(KE) = 0
2120  NEXT KE
2140  REM *** DESLOCAMENTOS NODAIS E REAÇÕES DOS APOIOS ***
2160  FOR JE = 6 TO 6 * NJ STEP 6
2170  NEXT JE
2180  REM *** AÇÕES NAS EXTREMIDADES DAS BARRAS ***
2200  FOR I = 1 TO M
2210  J1 = 6 * JJ(I) - 5: J2 = 6 * JJ(I) - 4: J3 = 6 * JJ(I) - 3: J4 =
6 * JJ(I) - 2: J5 = 6 * JJ(I) - 1: J6 = 6 * JJ(I)

```

```

2211 K1 = 6 * JK(I) - 5*K2 = 6 * JK(I) - 4*K3 = 6 * JK(I) - 3*K4 =
6 * JK(I) - 2*K5 = 6 * JK(I) - 1*K6 = 6 * JK(I)
2213 M1 = E * AX(I) / L(I):M5 = (6 * IX(I)) / L(I):M2 = (4 * E *
IY(I)) / L(I):M3 = (1.5 * M2) / L(I):M4 = (2 * M3) / L(I)
2215 Z2 = (4 * E * IZ(I)) / L(I):Z3 = (1.5 * Z2) / L(I):Z4 = (2 *
Z3) / L(I)
2220 GOSUB 6000: REM *** SUBPROGRAMA MATRIZ DE RIGIDEZ ***
2230 FOR K = 1 TO 4
2240 FOR J = 1 TO 12
2250 MSR(J,3 * K - 2) = SM(J,3 * K - 2) * R(I,1) + SM(J,3 * K - 1
) * R(I,4) + SM(J,3 * K) * R(I,7)
2260 MSR(J,3 * K - 1) = SM(J,3 * K - 2) * R(I,2) + SM(J,3 * K - 1
) * R(I,5) + SM(J,3 * K) * R(I,8)
2270 MSR(J,3 * K) = SM(J,3 * K - 2) * R(I,3) + SM(J,3 * K - 1) *
R(I,6) + SM(J,3 * K) * R(I,9)
2280 NEXT J: NEXT K
2300 FOR J = 1 TO 12
2310 AM(I,J) = AML(I,J) + MSR(J,1) * D(J1) + MSR(J,2) * D(J2) + M
SR(J,3) * D(J3) + MSR(J,4) * D(J4) + MSR(J,5) * D(J5) + MSR(J,6) *
D(J6) + MSR(J,7) * D(K1) + MSR(J,8) * D(K2) + MSR(J,9) * D(K3) +
MSR(J,10) * D(K4) + MSR(J,11) * D(K5) + MSR(J,12) * D(K6)
2315 PRINT AM(I,J)
2320 NEXT J
2330 NEXT I: PRINT
2340 GOSUB 3000: REM SUBPROGRAMA GUARDA AÇÕES - USE-O SEMPR
E QUE DESEJAR ARQUIVAR AS AÇÕES NAS EXTREMIDADES DAS BARRAS -

```

A P E N D I C E B

```

6000 PRINT " *****"
6010 PRINT " *** SUBPROGRAMA MATRIZ RIGIDEZ ***"
6020 PRINT " *****"
.....
6100 SM(1,1)=M1 : SM(1,7)=-M1 : SM(7,1)=-M1 : SM(7,7)=M1
6150 SM(2,2)=Z4 : SM(8,8)=Z4 : SM(2,8)=-Z4 : SM(8,2)=-Z4
6180 SM(2,6)=Z3 : SM(6,2)=Z3 : SM(2,12)=Z3 : SM(12,2)=Z3
6200 SM(6,8)=-Z3 : SM(8,6)=-Z3 : SM(8,12)=-Z3 : SM(12,8)=-Z3
6250 SM(3,3)=M4 : SM(9,9)=M4 : SM(3,9)=-M4 : SM(9,3)=-M4
6280 SM(3,5)=-M3 : SM(5,3)=-M3 : SM(3,11)=-M3 : SM(11,3)=-M3
6300 SM(4,4)=M5 : SM(10,10)=M5 : SM(4,10)=-M5 : SM(10,4)=-M5
6350 SM(5,5)=M2 : SM(11,11)=M2 : SM(5,11)=M2/2 : SM(11,5)=M2/2
6400 SM(5,9)=M3 : SM(9,5)=M3 : SM(9,11)=M3 : SM(11,9)=M3
6450 SM(6,6)=Z2 : SM(12,12)=Z2 : SM(6,12)=Z2/2 : SM(12,6)=Z2/2
6500 RETURN

```

A P E N D I C E

```

05 PRINT'' *****
07 PRINT'' *** SUBPROGRAMA INVERTE MATRIZ ***
09 PRINT'' *****

10 NMI = N-1

20 FOR I = 1 TO N
-----
30 DT = S(I,1)

40 DD = ABS(DT)

50 IF DD<=0.000001 THEN GOTO 190

60 FOR J = 1 TO NMI

70 J1 = J+1

80 S(I,J) = S(I,J1)/DT

90 NEXT J

100 S(I,N) = 1/DT

110 FOR L = 1 TO N

120 IF J = L THEN 130

130 U = S(L,1)

140 FOR J = 1 TO NMI : J1 = J+1

150 S(L,J) = S(I,J1)-U*S(I,J)

160 NEXT J

170 S(L,N) = -U/DT

180 NEXT L : NEXT I

```

A P Ê N D I C E D

```

5000 PRINT " *****"
5005 PRINT " *** SUBPROGRAMA PEGO PRÓPRIO ***"
5010 PRINT " *****"
5100 FOR I = 1 TO M : W = AX(I) * PE
5200 AML(I,2) = AML(I,2) + W * L(I) / 2 : AML(I,6) = AML(I,6) + W * L(I) ^ 2 / 12
5300 AML(I,8) = AML(I,8) + W * L(I) / 2 : AML(I,12) = AML(I,12) - W * L(I) ^ 2 / 12
5400 NEXT I : RETURN

```

A P Ê N D I C E E

```

20000 PRINT " *****"
20010 PRINT " *** SUBPROGRAMA AÇÕES NA BARRA ***"
20020 PRINT " *****"
20050 RX=100 : RY=15.5 : RZ=51 : MX= -2560 : YM=0 : ZM=7000
20100 AM(I,1)=E1+RX : AM(I,2)=E2+RY : AM(I,3)=E3+RZ : AM(I,4)=E4+MX
20300 AM(I,5)=E5+(E3*X)+YM+(RZ*(X-L1)) :
      AM(I,6)=E6-(E2*X)+ZM-(RY*(X-L1))
20310 T1=AM(I,1)/AX(I) : T2=AM(I,2)*AX(I)*YG/(2*IZ(I)*(A-C))
20320 T2=AM(I,3)*AX(I)*ZG/(2*IY(I)*B) : T4=AM(I,4)/(2*AP*T)
20330 T5=AM(I,5)*A/(2*IY(I)) : T6=AM(I,6)*B/(2*IZ(I))
20340 T8=AM(I,2)*T*(D+T)/(2*IZ(I)) : T9=AM(I,3)*T*(C+T)/(2*IY(I))
20350 T11=AM(I,5)*C/(2*IY(I)) : T12=AM(I,6)*D/(2*IZ(I)) : RETURN

```

A P Ê N D I C E F

```
30000 PRINT " *****"
30005 PRINT " ***** SUBPROGRAMA GUARDA AÇÕES *****"
30008 PRINT " *****"
30010 D5 = " " : REM CTRL-D
.....
30020 PRINT D5 : " OPEN AM "
30030 PRINT D5 : " WRITE AM "
30040 FOR I = 1 TO 7
30050 FOR J = 1 TO 12
30060 PRINT AM (I,J)
30070 NEXT J
30080 NEXT I
30090 PRINT D5 : " CLOSE AM "
30100 RETURN
```


A P Ê N D I C E G

```

2400 PRINT " *****"
2410 PRINT " *** SUBPROGRAMA LÊ AÇÕES ***"
2420 PRINT " *****"
2430 DIM AM (7,12)
2440 DS = "" : REM CTRL-D
2450 PRINT DL: "OPEN AM"
2460 PRINT DL: "READ AM"
.....
2470 FOR I= 1 TO 7 : FOR J= 1 TO 12
2480 INPUT AM (I,J)
2490 NEXT J : NEXT I
2495 PRINT DL: "CLOSE AM" : RETURN

```

A P Ê N D I C E H

```

31000 PRINT "*****"
31005 PRINT "*** GUARDA TMAX ***"
31008 PRINT "*****"
31010 DS = "" : REM CTRL-D
31020 PRINT DL: "OPEN TENSÃO MAX"
31030 PRINT DL: "LEITE TENSÃO MAX"
31035 FOR I = 1 TO 7
31040 PRINT TMAX
31045 NEXT I
31050 PRINT DL: "CLOSE TENSÃO MAX" : RETURN

```

A P Ê N D I C E I

```

0990 PRINT " ***** "
0995 PRINT " *** SUBPROGRAMA VARIAÇÃO SEÇÃO *** "
0999 PRINT " ***** "
10000 B = 4 : T1 = 0.325 : T2 = 0.651 : REM " DADOS DA ALTURA DA
-----
SEÇÃO (B) E DA ESPESSURA ( T1, T2). "
10010 IF I = 1 THEN A = 2 : T = T1 : GOTO 10060
10020 IF I = 2 OR I = 3 THEN A = 3 : T = T1 : GOTO 10060
10030 IF I = 4 OR I = 5 THEN A = 6 : T = T2 : GOTO 10070
10040 IF I = 6 THEN A = 2 : GOTO 10060
10050 IF I = 7 THEN A = 2
10060 C = A - 2 * T : D = B - 2 * T : AP = (A - T) * (B - T)
10070 AX(I) = (A * B - C * D) : IY(I) = (B * A ^ 3 - D * C ^ 3) / 12
10080 IZ(I) = (A * B ^ 3 - C * D ^ 3) / 12
10090 IX(I) = 12 * (A - T) ^ 2 * (B - T) ^ 2 * T / (A + B - 2 * T)
10100 RETURN

```

A P Ê N D I C E J

```

2500 PRINT " *****"
2505 PRINT " **** SUBPROGRAMA TENSÃO MÁXIMA ****"
2508 PRINT " *****"
2510 DIM TM(200),C(16)
2520 FOR I = 1 TO M
2530 GOSUB 10000:TMAX = 0
2535 E1 = AM(I,1):E2 = AM(I,2):E3 = AM(I,3):E4 = AM(I,4):E5 = AM(
.....I,5):E6 = AM(I,6)
2540 ZG = (2 * A * (D + T) + D ^ 2) / (4 * (A + D)):YG = (2 * B *
(C + T) + C ^ 2) / (4 * (B + C))
2542 T1 = AM(I,1) / AX(I):T2 = AM(I,2) * AX(I) * YG / (2 * IZ(I) *
(A - C))
2544 T3 = AM(I,3) * AX(I) * ZG / (2 * IY(I) * (B - D)):T4 = AM(I,
4) / (2 * AP * T)
2546 C2 = AM(I,2) * T * (D + T) / (2 * IZ(I))
2548 C3 = AM(I,3) * T * (C + T) / (2 * IY(I))
2549 IF I = 1 OR I = 2 OR I = 6 THEN FOR X = 0 TO 1: GOTO 2560
2550 IF I = 4 OR I = 7 THEN FOR X = 70 TO L(I): GOTO 2560
2552 IF I = 5 THEN FOR X = 0 TO L(I) STEP 5: GOTO 2560
2553 IF I = 3 THEN FOR X = 0 TO L(I) STEP 3: GOTO 2560
2555 FOR X = 0 TO L(I)
2560 YH = AM(I,5) + AM(I,3) * X:ZM = AM(I,6) - AM(I,2) * X
2570 T5 = YH * A / (2 * IY(I)):T6 = ZM * B / (2 * IZ(I))
2580 C5 = YH * C / (2 * IY(I)):C6 = ZM * D / (2 * IZ(I))
2590 IF I = 4 AND X > = 15 THEN L1 = 15: GOSUB 20000: GOTO 2610

```

```

2600 IF I = 5 AND X > = 60 THEN L1 = 60: GOSUB 20000: GOTO 2610
2610 FOR N = 1 TO 18
2620 ON N GOTO 2630,2640,2650,2660,2670,2680,2690,2700,2710,2720,
2730,2740,2750,2760,2770,2780
2630 TX = - T1 + T5 + T6:TY = 0: GOTO 2790
2640 TX = - T1 + T6:TY = T3 + T4: GOTO 2790
2650 TX = - T1 - T5 + T6:TY = 0: GOTO 2790
2660 TX = - T1 - T5:TY = T2 - T4: GOTO 2790
2670 TX = - T1 - T5 - T6:TY = 0: GOTO 2790
2680 TX = - T1 - T6:TY = T3 - T4: GOTO 2790
.....
2690 TX = - T1 + T5 - T6:TY = 0: GOTO 2790
2700 TX = - T1 + T5:TY = T2 + T4: GOTO 2790
2710 TX = - T1 - C5 + C6:TY = SQR ((C3 + T4) ^ 2 + C2 ^ 2): GOTO
2790
2720 TX = - T1 + C6:TY = SQR ((T3 + T4) ^ 2 + C2 ^ 2): GOTO 2790
2730 TX = - T1 + C5 + C6:TY = SQR ((T4 - C3) ^ 2 + C2 ^ 2): GOTO
2790
2740 TX = - T1 + C5:TY = SQR ((2 + T4) ^ 2 + C3 ^ 2): GOTO 2790
2750 TX = - T1 + C5 - C6:TY = SQR ((T4 + C3) ^ 2 + C2 ^ 2): GOTO
2790
2760 TX = - T1 - C6:TY = SQR ((ABS T3 - T4) ^ 2 + C2 ^ 2): GOTO 27
90
2770 TX = - T1 - C5 - C6:TY = SQR ((C3 - T4) ^ 2 + C2 ^ 2): GOTO
2790
2780 TX = - T1 - C5:TY = SQR ((T2 - T4) ^ 2 + C3 ^ 2): GOTO 2790

```

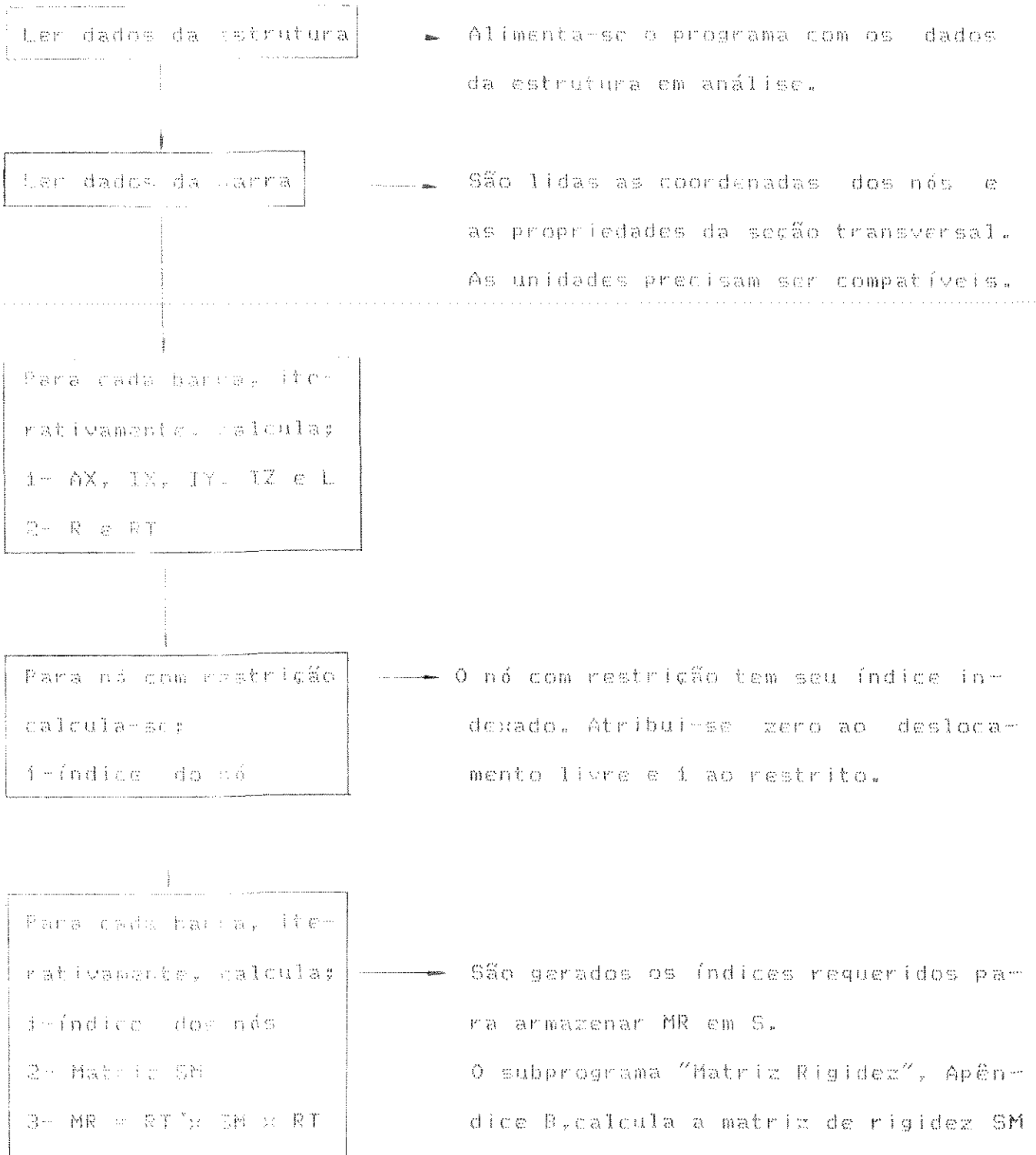
```
2790 C(N) = SQRT ((TX / 2) ^ 2 + TY ^ 2)
2800 IF C(N) > TMAX THEN TMAX = C(N)
2810 NEXT N:K = ABS (X - 1):TM(X) = TMAX
2820 IF TM(X) > TM(K) THEN TMAX = TM(X): REM TM(X) É A TENSÃO
O MÁXIMA NA SEÇÃO X
2830 NEXT X
2850 NEXT I: STOP
```

Matriz de rigidez de barra do pórtico espacial, SM(12x12)

| | | | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|---------|----------|----------|------|-----------|-----------|---------|----------|----------|
| EAX | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -EAX | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L | | | | | | L | | | | | |
| 0 | $12EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $6EI_Z$ | 0 | $-12EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $6EI_Z$ |
| | L^3 | | | | L^2 | | L^3 | | | | L^2 |
| 0 | 0 | $12EI_Y$ | 0 | $-6EI_Y$ | 0 | 0 | 0 | $-12EI_Z$ | 0 | $-6EI_Y$ | 0 |
| | | L^3 | | L^2 | | | | L^3 | | L^2 | |
| 0 | 0 | 0 | $6I_Z$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $-6I_X$ | 0 | 0 |
| | | | L | | | | | | L | | |
| 0 | 0 | $-6EI_Y$ | 0 | $4EI_Y$ | 0 | 0 | 0 | $6EI_Y$ | 0 | $2EI_Y$ | 0 |
| | | L^2 | | L | | | | L^2 | | L | |
| 0 | $6EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $4EI_Z$ | 0 | $-6EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $2EI_Z$ |
| | L^2 | | | | L | | L^2 | | | | L |
| -EAX | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | EAX | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L | | | | | | L | | | | | |
| 0 | $-12EI_Y$ | 0 | 0 | 0 | $-6EI_Z$ | 0 | $12EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $-6EI_Z$ |
| | L^3 | | | | L^2 | | L^3 | | | | L^2 |
| 0 | 0 | $-12EI_Y$ | 0 | $6EI_Y$ | 0 | 0 | 0 | $12EI_Y$ | 0 | $6EI_Y$ | 0 |
| | | L^3 | | L^2 | | | | L^3 | | L^2 | |
| 0 | 0 | 0 | $-6I_X$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $6I_X$ | 0 | 0 |
| | | | L | | | | | | L | | |
| 0 | 0 | $-6EI_Y$ | 0 | $2EI_Y$ | 0 | 0 | 0 | $6EI_Y$ | 0 | $4EI_Y$ | 0 |
| | | L^2 | | L | | | | L^2 | | L | |
| 0 | $6EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $2EI_Z$ | 0 | $-6EI_Z$ | 0 | 0 | 0 | $4EI_Z$ |
| | L^2 | | | | L | | L^2 | | | | L |

A P Ê N D I C E II

Diagrama de Blocos da Análise de Pórticos Espaciais



Armazena NE em S
Calcula S-1

Inversão da matriz de rigidez.

Para cada nó com carga, lê-se:
1- número do nó
2- cargas aplicadas

As cargas são descritas nas coordenadas da estrutura e adicionadas diretamente na matriz A. Utiliza-se algoritmo simples para calcular a localização em função do número do nó.

Para cada nó com carga:
1- ler número do nó
2- ler as cargas
3- calcular AML

As cargas são descritas nas coordenadas da barra. Calcula as ações nos extremos da barra e adiciona em AE.

Para cada barra, iterativamente, calcula:
1- $W = AX \times PE$
2- AML

Considera o peso próprio da estrutura. Calcula o volume de material na barra, multiplica pelo comprimento da barra e determina AML devido ao peso próprio. Adiciona em AE.

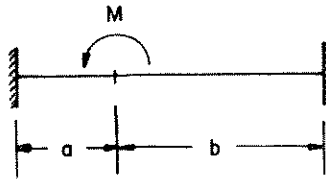
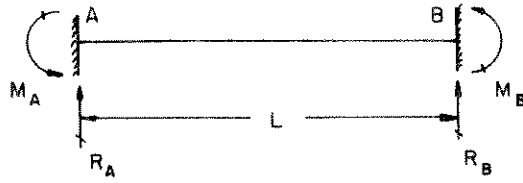
Para todos possíveis deslocamentos:
1- calcula $GC = A + AE$

Calcula as cargas nodais combinadas descritas nas coordenadas da estrutura.

Para cada barra, iterativamente, calcula:
1- $D = D + S \times GC$
2- $AM = AML + MSR \times D$

Calcula os valores dos deslocamentos do nó em relação a estrutura e das ações nas extremidades da barra em relação a seus eixos.

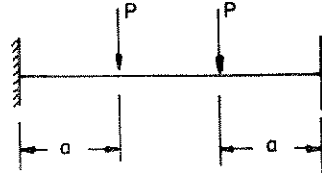
APÊNDICE N
Ações de engastamento



$$M_A = Mb(2a-b)/L^2$$

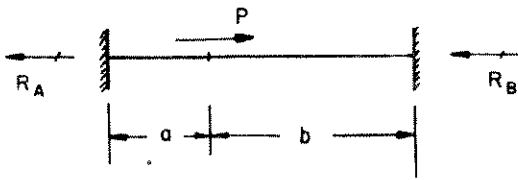
$$M_B = Ma(2b-a)/L^2$$

$$R_A = -R_B = 6Mab/L^3$$



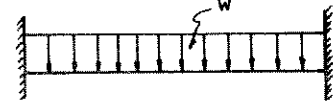
$$M_A = -M_B = Pa(L-a)/L$$

$$R_A = R_B = P$$



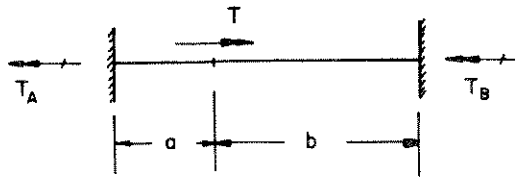
$$R_A = Pb/L$$

$$R_B = Pa/L$$



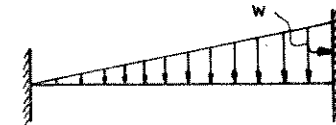
$$M_A = -M_B = wL^2/12$$

$$R_A = R_B = wL/2$$



$$T_A = Tb/L$$

$$T_B = Ta/L$$

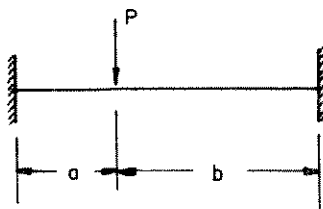


$$M_A = wL^2/30$$

$$M_B = -wL^2/20$$

$$R_A = 3wL/20$$

$$R_B = 7wL/20$$

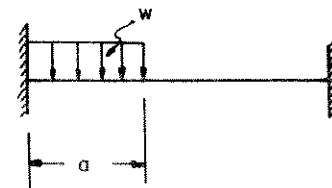


$$M_A = Pab^2/L^2$$

$$M_B = -Pa^2b/L^2$$

$$R_A = Pb^2(3a+b)/L^3$$

$$R_B = Pa^2(a+3b)/L^3$$



$$M_A = wa^2(6L^2 - 6aL + 3a^2)/12L^2$$

$$M_B = -wa^3(4L - 3a)/12L^2$$

$$R_A = wa(2L^3 - 2a^2L + a^3)/2L^3$$

$$R_B = wa^3(2L - a)/2L^3$$

A P Ê N D I C E 0

VARIÁVEIS DA ESTRUTURA
- CODIFICADAS -

TENSÕES MÁXIMAS NAS BARRAS

| C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | TMAX1 | TMAX2 | TMAX3 | TMAX4 | TMAX5 | TMAX6 | TMAX7 |
|----|----|----|----|----|----|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 4317 | 5989 | 2185 | 7595 | 5468 | 2201 | 5320 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 4274 | 5834 | 1547 | 6678 | 4775 | 1985 | 4692 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 3064 | 4531 | 1803 | 7217 | 5424 | 1870 | 4980 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 3026 | 4411 | 1644 | 6377 | 4741 | 1686 | 4438 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 3803 | 5359 | 1965 | 6633 | 5422 | 1992 | 5777 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 3761 | 5220 | 1907 | 5897 | 4741 | 1810 | 5366 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 2737 | 4039 | 1621 | 6285 | 5373 | 1702 | 5172 |
| -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2692 | 3941 | 1501 | 5580 | 4700 | 1545 | 4727 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 4194 | 5063 | 2163 | 6479 | 4616 | 1921 | 4662 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 4241 | 5170 | 2446 | 7347 | 5261 | 2112 | 5261 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 3037 | 3824 | 2308 | 6907 | 5122 | 1751 | 4853 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2989 | 3748 | 2054 | 6124 | 4506 | 1595 | 4348 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3792 | 4753 | 2466 | 6471 | 5217 | 1932 | 5720 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 3717 | 4650 | 2212 | 5770 | 4580 | 1763 | 5188 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 2607 | 3359 | 2225 | 5924 | 5050 | 1554 | 4797 |
| -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2683 | 3453 | 2033 | 5352 | 4466 | 1462 | 4517 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 4276 | 5786 | 1987 | 5969 | 4146 | 1760 | 4167 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 4244 | 5628 | 1887 | 5199 | 3601 | 1503 | 3617 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|------|
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 2873 | 4214 | 1516 | 5690 | 4108 | 1458 | 3949 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2841 | 4086 | 1420 | 4981 | 3571 | 1309 | 3473 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 3729 | 5133 | 1792 | 5355 | 4119 | 1617 | 4926 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 3696 | 4986 | 1699 | 4715 | 3579 | 1467 | 4398 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 2645 | 3888 | 1398 | 5054 | 4081 | 1376 | 4391 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2611 | 3774 | 1312 | 4464 | 3549 | 1244 | 3957 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 4182 | 5051 | 1862 | 5810 | 4016 | 1729 | 4149 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 4131 | 4936 | 1628 | 5072 | 3503 | 1568 | 3620 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 2976 | 3755 | 1783 | 5526 | 3923 | 1435 | 3914 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2932 | 3665 | 1567 | 4847 | 3430 | 1300 | 3454 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3689 | 4593 | 1954 | 5244 | 3989 | 1586 | 4771 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 3640 | 4479 | 1707 | 4626 | 3480 | 1444 | 4273 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 2631 | 3426 | 1770 | 4868 | 3893 | 1316 | 4206 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2589 | 3343 | 1581 | 4319 | 3405 | 1195 | 3804 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3526 | 5003 | 1360 | 7486 | 5472 | 2757 | 5667 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 3492 | 4902 | 1262 | 6588 | 4774 | 2468 | 5858 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 2520 | 3622 | 1187 | 7091 | 5440 | 2483 | 5162 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2476 | 3564 | 1065 | 6272 | 4750 | 2224 | 4653 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 3295 | 4379 | 1304 | 6491 | 5442 | 2461 | 6236 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 3237 | 4310 | 1182 | 5782 | 4751 | 2223 | 5685 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 2402 | 3111 | 1109 | 6105 | 5400 | 2158 | 5334 |
| -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2337 | 3085 | 1004 | 5436 | 4718 | 1954 | 4914 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 3436 | 4409 | 2185 | 7175 | 5309 | 2612 | 5517 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 3395 | 4344 | 1957 | 6337 | 4651 | 2366 | 4946 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 2471 | 3124 | 1968 | 6703 | 5193 | 2158 | 4956 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2428 | 3095 | 1773 | 5955 | 4559 | 1961 | 4490 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3294 | 3951 | 2026 | 6289 | 5268 | 2365 | 5949 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|------|
| -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 3227 | 3905 | 1830 | 5614 | 4618 | 2153 | 5443 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 2421 | 2764 | 1783 | 5829 | 5143 | 1928 | 5019 |
| -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2349 | 2755 | 1619 | 5214 | 4519 | 1759 | 4644 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3466 | 4914 | 1170 | 5893 | 4139 | 2147 | 4574 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 3472 | 4794 | 1098 | 5136 | 3593 | 1910 | 4028 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 2457 | 3607 | 929 | 5641 | 4113 | 1935 | 4249 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2427 | 3524 | 833 | 4938 | 3572 | 1717 | 3780 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 3172 | 4313 | 1078 | 5254 | 4122 | 1963 | 5273 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 3135 | 4219 | 1002 | 4630 | 3579 | 1765 | 4748 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 2253 | 3122 | 889 | 4923 | 4091 | 1725 | 4613 |
| -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 2209 | 3067 | 800 | 4352 | 3555 | 1552 | 4320 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 3389 | 4383 | 1712 | 5694 | 4039 | 2103 | 4479 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 3361 | 4296 | 1516 | 4979 | 3517 | 1896 | 3959 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 2389 | 3156 | 1565 | 5385 | 3961 | 1751 | 4109 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2355 | 3103 | 1393 | 4734 | 3456 | 1577 | 3673 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 3151 | 3925 | 1624 | 5112 | 4016 | 1927 | 5065 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 3106 | 3854 | 1453 | 4515 | 3500 | 1746 | 4576 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 2258 | 2801 | 1445 | 4751 | 3934 | 1580 | 4376 |
| -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2206 | 2766 | 1299 | 4215 | 3435 | 1431 | 3996 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3265 | 4861 | 1842 | 7524 | 5467 | 2692 | 5272 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 3231 | 4759 | 1748 | 6618 | 4773 | 2442 | 4676 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 2297 | 3578 | 1445 | 7144 | 5426 | 2359 | 4859 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2263 | 3510 | 1352 | 6313 | 4741 | 2141 | 4356 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 2884 | 4491 | 1717 | 6626 | 5428 | 2473 | 5819 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 2854 | 4395 | 1627 | 5895 | 4742 | 2254 | 5271 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 2015 | 3304 | 1338 | 6158 | 5377 | 2124 | 5043 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1988 | 3247 | 1253 | 5482 | 4702 | 1937 | 4616 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 3202 | 4110 | 1756 | 7272 | 5257 | 2277 | 5213 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 3160 | 4054 | 1527 | 6414 | 4611 | 2078 | 4645 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 2263 | 2929 | 1695 | 6829 | 5124 | 1935 | 4737 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2224 | 2903 | 1490 | 6055 | 4505 | 1768 | 4267 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2903 | 3901 | 1854 | 6461 | 5218 | 2116 | 5601 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 2862 | 3843 | 1641 | 5758 | 4579 | 1934 | 5091 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 2051 | 2796 | 1731 | 5885 | 5081 | 1780 | 4792 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2014 | 2772 | 1542 | 5274 | 4469 | 1632 | 4405 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3236 | 4754 | 1647 | 5916 | 4142 | 2200 | 4182 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 3206 | 4640 | 1574 | 5154 | 3597 | 1990 | 3656 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 2265 | 3529 | 1251 | 5673 | 4112 | 1919 | 3935 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 2235 | 3441 | 1179 | 4963 | 3573 | 1731 | 3473 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 2839 | 4357 | 1527 | 5347 | 4118 | 2033 | 4841 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 2813 | 4247 | 1455 | 4706 | 3578 | 1845 | 4331 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1972 | 3239 | 1158 | 4973 | 4082 | 1743 | 4290 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1949 | 3161 | 1010 | 4403 | 3550 | 1581 | 3874 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 3156 | 4088 | 1292 | 5754 | 4009 | 1878 | 4162 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 3120 | 4016 | 1202 | 5025 | 3496 | 1708 | 3656 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 2217 | 2952 | 1260 | 5463 | 3919 | 1600 | 3864 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2182 | 2905 | 1087 | 4795 | 3425 | 1452 | 3431 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2834 | 3839 | 1415 | 5231 | 3985 | 1749 | 4687 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 2799 | 3763 | 1253 | 4612 | 3476 | 1594 | 4206 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1988 | 2791 | 1340 | 4828 | 3893 | 1476 | 4105 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1956 | 2745 | 1179 | 4287 | 3404 | 1345 | 3721 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 2595 | 4361 | 1393 | 7459 | 5463 | 2983 | 5616 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 2579 | 4282 | 1297 | 6565 | 4767 | 2683 | 5027 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1792 | 3116 | 1117 | 7065 | 5431 | 2674 | 5081 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|----|
| 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1772 | 3077 | 1026 | 6249 | 4742 | 2406 | 45 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 2520 | 3390 | 1300 | 6507 | 5434 | 2747 | 61 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 2478 | 3841 | 1216 | 5794 | 4744 | 2484 | 56 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1835 | 2736 | 1043 | 6020 | 5392 | 2414 | 52 |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1785 | 2725 | 947 | 5363 | 4712 | 2187 | 48 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 2584 | 3777 | 1859 | 7154 | 5287 | 2605 | 54 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 2558 | 3735 | 1645 | 6319 | 4631 | 2358 | 49 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1803 | 2623 | 1709 | 6684 | 5170 | 2201 | 48 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1775 | 2614 | 1527 | 5938 | 4539 | 2002 | 44 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1818 | 2377 | 1424 | 5138 | 4504 | 1847 | 45 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 2515 | 3423 | 1574 | 5625 | 4603 | 2160 | 53 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1873 | 2367 | 1583 | 5732 | 5126 | 2023 | 49 |
| 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2551 | 3449 | 1762 | 6302 | 5250 | 2372 | 58 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 2595 | 4306 | 1192 | 5875 | 4132 | 2365 | 45 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 2587 | 4206 | 1118 | 5118 | 3587 | 2116 | 40 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1782 | 3128 | 926 | 5619 | 4107 | 2113 | 42 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1772 | 3064 | 854 | 4919 | 3567 | 1886 | 37 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 2431 | 3860 | 1112 | 5261 | 4117 | 2200 | 52 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 2409 | 3782 | 1041 | 4635 | 3575 | 1979 | 46 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 1719 | 2767 | 856 | 4872 | 4086 | 1929 | 45 |
| 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1683 | 2726 | 790 | 4322 | 3551 | 1737 | 41 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 2563 | 3790 | 1407 | 5676 | 4022 | 2095 | 44 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 2544 | 3725 | 1226 | 4963 | 3503 | 1884 | 39 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1772 | 2685 | 1321 | 5368 | 3943 | 1789 | 40 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1756 | 2652 | 1162 | 4719 | 3441 | 1614 | 36 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 2448 | 3463 | 1364 | 5119 | 4003 | 1932 | 50 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 2417 | 3410 | 1207 | 4520 | 3488 | 1750 | 45 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1749 | 2433 | 1248 | 4702 | 3920 | 1655 | 4319 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1710 | 2414 | 1108 | 4182 | 3433 | 1501 | 3946 |
| -2.65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3858 | 4653 | 1798 | 5526 | 4379 | 1773 | 4768 |
| 2.65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1957 | 3036 | 1021 | 5497 | 4252 | 2112 | 4622 |
| 0 | -2.65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3429 | 3952 | 726 | 5814 | 4229 | 1563 | 3922 |
| 0 | 2.65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2161 | 2850 | 1009 | 5479 | 4264 | 2095 | 4764 |
| 0 | 0 | -2.65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2636 | 3620 | 2075 | 7735 | 6741 | 2645 | 6255 |
| 0 | 0 | 2.65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2489 | 3578 | 1051 | 4264 | 3129 | 1464 | 3766 |
| 0 | 0 | 0 | -2.65 | 0 | 0 | 0 | 2481 | 4330 | 1126 | 5772 | 4400 | 3645 | 4932 |
| 0 | 0 | 0 | 2.65 | 0 | 0 | 0 | 2492 | 3132 | 2074 | 5397 | 4033 | 1616 | 4510 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | -2.65 | 0 | 0 | 2729 | 3864 | 1298 | 6271 | 4270 | 1968 | 3300 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 2.65 | 0 | 0 | 2316 | 3162 | 1245 | 5006 | 4215 | 1638 | 4630 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2.65 | 0 | 3785 | 4874 | 2092 | 5716 | 3233 | 1963 | 4320 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.65 | 0 | 2027 | 3401 | 2168 | 5359 | 3985 | 1133 | 4320 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2.65 | 2499 | 2508 | 1301 | 4025 | 3503 | 1697 | 3134 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.65 | 2446 | 3129 | 1529 | 4059 | 3397 | 2148 | 3894 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2513 | 3682 | 1309 | 5509 | 4257 | 1850 | 4710 |

Tab. 0.1.1 - Banco de dados das variáveis da estrutura e das respectivas tensões máximas (N/cm²).

* C1 até C7 representam as variáveis da estrutura A1 a A7. Estão codificadas para efeitos de regressão, onde -1 e 1 representam valores extremos e 0 (zero) o valor intermediário dos níveis de variação.