

## ANÁLISE DE ESPECTROS DE CARGA COMPLEXOS USANDO O MÉTODO RAINFLOW E SUA UTILIZAÇÃO NA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UMA ESTRUTURA SOLDADA EM LIGA DE ALUMÍNIO

C. Reis Gomes, J. A. Vasconcelos, A. A. Fernandes

DEMEGI - FEUP, Rua dos Bragas - 4099 Porto - Portugal

**Sumário:** Na presente comunicação é feita uma apresentação da análise estrutural estática e dinâmica duma cisterna autoportante fabricada numa liga de alumínio do tipo A 5083. A análise estática foi efectuada pelo método dos elementos finitos. O modelo numérico foi comparado com os resultados obtidos por análise experimental de tensões. Os espectros de carga, medidos em circuitos tipo, foram objecto de tratamento pelo método de contagem "Rainflow", e foram usados no cálculo da resistência à fadiga, recorrendo à lei de danos acumulados de Miner.

**Abstract :** The work being reported in this paper covers a study conducted to analyse the static and dynamic strength of a self-supporting welded aluminium alloy car tanker for the transport of powder products. Finite element calculations, to evaluate static strength, were carried out. The numerical method was validated by experimental stress analysis. In order to study the fatigue strength, real load spectra measured in a instrumented tanker were treated using the rainflow counting method and Miner damage law.

### 1. INTRODUÇÃO

Este estudo tinha como objectivo a análise estrutural de uma cisterna autoportante, construída numa liga de alumínio do tipo A5083. O estudo visava a optimização do projecto da cisterna.

A cisterna está sujeita em serviço a solicitações estáticas e dinâmicas. As solicitações estáticas incluem as acções devidas ao peso próprio da estrutura e carga e ainda as acções devidas à pressão de ensaio estático e à pressão de descarga.

As solicitações dinâmicas resultam das condições de utilização em estrada, devido às irregularidades do pavimento ou a obstáculos de que podem resultar solicitações assimétricas sobre os rodados. O seu efeito sobre a estrutura é no entanto minorado pelo modo de ligação do chassis e cisterna à unidade tractora e pela suspensão do trailer. A cisterna utiliza um sistema de "King Pin" que permite uma rotação da cisterna sem transmissão de esforços do tractor à estrutura.

### 2. MODELIZAÇÃO ESTRUTURAL

A análise de tensões e deformações na estrutura da cisterna foi efectuada recorrendo ao método dos elementos finitos. Dada a geometria do reservatório foram utilizados fundamentalmente elementos de casca fina.

No caso das solicitações estáticas, (peso próprio, carga e pressão de ensaio) foi considerado um modelo de elementos finitos correspondente a metade da estrutura, impondo condições fronteira correspondentes a essa simetria, nos nós situados no plano de simetria. Nas figuras 1 e 2 apresentam-se diferentes aspectos da malha de elementos finitos utilizada.

A acção da carga a transportar (S1) foi simulada por uma pressão hidrostática provocada pelo material pulverolento a transportar. Para uma densidade de 1,3 o valor médio da carga considerado foi de 30 toneladas.

O peso próprio da cisterna (S2) é calculado automaticamente pelo programa de análise em função da geometria do modelo e da densidade do material usado.

A cisterna é submetida a um ensaio de estanqueidade sob uma pressão interna de 3 kgf/cm<sup>2</sup> (S3).

Para as solicitações simples descritas atrás foram determinadas as tensões resultantes na estrutura da cisterna, para as seguintes combinações de acções:

- i) Resultante das acções da carga e do peso próprio

$$C1 = S1 + S2$$

- ii) Peso próprio e pressão de ensaio

$$C2 = S2 + 1.0 \times S3$$

- iii) Peso próprio, carga e pressão de descarga (1.8 kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $C3 = S1 + S2 + 0.6 \times S3$

Será analisada em particular pela sua relevância no contexto desta comunicação a combinação C1.

Considerou-se que a espessura da chapa do reservatório (fundos esféricos, virola cilíndrica e zona cônica) era de 5mm. A liga de alumínio usada no fabrico da cisterna tinha as seguintes propriedades :

Módulo de elasticidade	$E = 7.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Módulo de elasticidade transversal	$G = 2.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	$\mu = 0.33$
Tensão de rotura	295 MPa
Tensão de cedência	158 MPa
Alongamento	22%

A modelização efectuada permitiu fazer uma avaliação do nível de tensões estáticas instaladas.

Para a sobreposição dos efeitos do peso próprio e do peso da carga verificou-se que no reservatório as tensões médias eram em geral inferiores a 47 MPa (Fig.3), elevando-se na zona de ligação ao chassis para valores da ordem dos 100 MPa. Na modelização numérica efectuada pelo método dos elementos finitos considerou-se que a espessura do reservatório é constante.

A análise experimental de tensões efectuada numa cisterna instrumentada para o efeito, identificou os valores máximos de tensão de Von Mises na cisterna, para a combinação do peso próprio e carga. A tensão máxima medida no corpo da cisterna foi de 47 MPa; na ligação do chassis ao cone foram medidas tensões de 65 MPa. Estes valores são da mesma grandeza dos valores determinados pela análise por elementos finitos.

### 3. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA

A verificação à fadiga das juntas soldadas da cisterna foi efectuada recorrendo às curvas de projecto propostas no projecto de norma BS8118 [1].

Como descrito anteriormente o estado de tensões elásticas na cisterna quando sujeita ao peso próprio e carga foram obtidas através de modelização por elementos finitos e análise experimental de tensões. As tensões devidas às operações de carga e descarga não têm praticamente influência no comportamento à fadiga dado que o número de ciclos devido ao enchimento e esvaziamento da cisterna se pode considerar irrelevante durante a vida operacional da cisterna.

A circulação do veículo que transporta a cisterna (do tipo autoportante) é no entanto susceptível de introduzir tensões dinâmicas devido às forças de inércia, que por

sua vez são função da massa do veículo, da carga transportada e da aceleração/desaceleração e ainda de obstáculos do pavimento. São diversas as acções que poderão originar aquelas forças tais como [2,3]:

#### i) Acções verticais simétricas

Estas acções resultam da existência de obstáculos como ondulação do pavimento, buracos de passeio ( $h = 15 \text{ cm}$ ); ocorrem quando as rodas da frente do veículo chocam simultaneamente com obstáculos do tipo atrás referido, originando acelerações verticais simétricas e forças verticais que podem atingir até 3 vezes o peso do veículo (com ou sem carga)

#### ii) Acções verticais assimétricas

As forças verticais assimétricas surgem quando o veículo circula sobre uma superfície desigual com obstáculos que podem ter até 30 cm no caso dos camiões. Cada roda encontra o obstáculo em tempos diferentes, ficando a estrutura sujeita a um momento torsor e um momento flector; em geral usa-se um coeficiente de majoração de 1.5 tanto das cargas suspensas como do momento introduzido

#### iii) Acções longitudinais

As acções longitudinais são devidas a acelerações ou travagem do camião. O coeficiente de majoração varia em geral entre 0.7 a 1.0.

#### iv) Acções laterais

As acções laterais surgem quando o veículo circula numa curva ou choca lateralmente com um obstáculo. As acções laterais máximas devido às forças centrífugas ao circular numa curva estão limitadas pela aderência rodas/pavimento. O coeficiente de majoração proposto é de 0.7 a 1.0.

A combinação das acções atrás referidas, devidas à circulação do veículo, é susceptível de criar um espectro de carga durante a sua vida operacional que pode originar danos de fadiga, o que motiva o aparecimento de fendas não só no chassis como na própria cisterna.

Para fazer a avaliação correcta da resistência à fadiga da cisterna torna-se assim indispensável conhecer o espectro de carga a que o veículo vai estar sujeito em serviço, não sendo suficiente o conhecimento da tara e peso bruto.

O espectro de carga tem que ser avaliado experimentalmente por meio de análise experimental de tensões e posterior tratamento estatístico dos registos obtidos em camiões instrumentados para o efeito.

A análise do comportamento à fadiga envolve os seguintes passos:

- Identificação dos pontos críticos da estrutura

- Estimativa do espectro de carga no ponto crítico
- Classificação do detalhe da estrutura de acordo com a norma BS8118 e determinação da curva de projecto correspondente

As curvas de projecto assumem a seguinte forma:

$$\sigma_r^m \times N = K_2$$

N - duração à fadiga, ciclos

$\sigma_r$  - gama de tensão

$K_2$  - constante dependente da classe do detalhe

m - constante

No presente caso usa-se como filosofia de projecto a filosofia "safe life", isto é, a probabilidade de ocorrência duma rotura por fadiga durante a vida operacional da estrutura é diminuta (toma-se em geral igual a 2,5%).

As tensões do espectro não tem amplitude constante pelo que a verificação da resistência à fadiga é feita recorrendo a uma lei linear de danos acumulados, conhecida como regra de Miner [4] expressa por :

$$\sum \frac{n}{N} \leq 1$$

n - número de ciclos real a uma dada gama de tensão

N - número de ciclos para a rotura para uma dada gama de tensão e classe do detalhe

Para efeito de cálculo considerou-se o espectro de carga real determinado por análise experimental de tensões, no ponto mais crítico; os resultados são apresentados em relatório confidencial [5].

Na figura 4 ilustra-se parte do espectro real sob a forma de tensões equivalentes, determinadas pelo critério de Von Mises.

A fim de determinar o número de ciclos de variação da carga foi usado o método de contagem de ciclos "Rainflow Method", susceptível de ser tratado em computador. Para o efeito foi elaborado um programa, que permite calcular as gamas de tensão e número de ciclos em que elas ocorrem bem como as respectivas frequências.

Nas figuras 5 e 6 são apresentados o histograma e a função de densidade de probabilidade de ocorrências num percurso típico de estrada.

Por limitação do sistema de aquisição de dados foi medido unicamente o espectro durante um período de 160 segundos tendo sido identificados 2839 ciclos por

aplicação do método de contagem "Rainflow". A gama de tensão dos diferentes ciclos variava entre 1 e 57 MPa. Destes ciclos nem todos provocam danos de fadiga, pelo menos na fase inicial de propagação.

A fim de avaliar quais os ciclos que poderão na fase inicial provocar danos de fadiga recorreu-se a conceitos de Mecânica da Fractura. Para o efeito considerou-se que no pé da soldadura de canto existente nas proximidades do ponto em análise estava presente um pequeno defeito de mordedura com 0.2 mm de profundidade (defeito esse que não é detectável por inspecção visual).

De acordo com a metodologia proposta no documento PD 6493 [6] uma fenda de fadiga não se propagará se o factor de intensidade de tensões relativo ao limiar de propagação  $\Delta K_0$  para juntas soldadas em liga de alumínio.

$$\Delta K_0 = 21N \cdot \text{mm}^{-3/2}$$

Atendendo a que o factor de intensidade de tensões no pé da soldadura de canto pode ser calculado pela expressão

$$K = \frac{M_k M_m \sigma}{\phi} \sqrt{\pi a}$$

$$Y = \frac{M_k M_m}{\phi} \quad \text{factor de calibração}$$

$$a = \emptyset 2\text{mm}$$

Usando o documento PD 6493 foi possível fazer uma avaliação do valor de K para a geometria em causa, a qual pode ser expressa em termos de gama de factor de intensidade e gama de tensão.

$$\Delta K = 1.09 \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$M_K = 1.67$$

$$M_m = 1.04$$

$$\phi = 1.57$$

Tendo em conta que  $\Delta K_0 = 21N \cdot \text{mm}^{-3/2}$  então é possível determinar o valor de  $\Delta \sigma_0$  que corresponde ao valor da gama de tensão abaixo do qual os ciclos de carga correspondentes não produzem danos de fadiga, pelo menos até a fenda atingir dimensões apreciáveis. Verificou-se que :

$$\Delta \sigma_0 < 24N / \text{mm}^2$$

Para o ponto em análise considerou-se que durante o período de 160 s ocorreram 210 ciclos susceptíveis de propagar uma fenda com 0,2 mm de profundidade.

Atendendo a que o ensaio de medição do espectro de carga foi efectuado a uma velocidade média de 50 km/hora e admitindo que o camião/cisterna percorre num ano 5.000 km podemos calcular o número de ciclos de carga significativos num ano como sendo igual a :

$$N_{\text{ciclos}} = 4.75 \times 10^6 \text{ ciclos}$$

Para uma vida de 10 anos (típico para veículos) a duração requerida seria de :

$$n_0 = 4.75 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

Será esta duração que será usada no cálculo dos danos de fadiga acumulados ao longo da vida da cisterna.

A expressão da regra de Miner para um espectro contínuo pode ser expressa por [7].

$$D = \int \frac{n_0 f(S)}{N(S)} ds$$

$n_0 f(S)$  - número de ciclos a uma dada gama de tensões  
 $N(S)$  - número de ciclos até à rotura

A análise dos desenhos de fabrico da cisterna mostra que as juntas soldadas da cisterna são basicamente de dois tipos: Juntas topo a topo com penetração total e juntas de canto do tipo cobrejunta, como ilustrado na figura 7.

Dado que existem juntas de canto, serão estas a condicionar a duração à fadiga da cisterna.

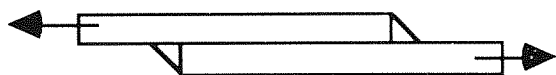


Figura 7 - Junta de canto

A junta foi considerada da classe E 20 a que corresponde a curva de projecto:

$$m = 3$$

$$K_2 = 1.6 \times 10^{10}$$

$$\sigma_r^m \times N \leq K_2$$

ou

$$N = 1.6 \times 10^{10} \times \sigma_r^{-3}$$

Considerando que durante a vida operacional da cisterna o número máximo de ciclos é de

$$n_0 = 4.75 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

calculou-se o valor de D, somatório dos danos acumulados, para diferentes valores da gama de tensão máxima susceptível de estar presente na cisterna e no detalhe em causa. Verificou-se que os danos acumulados para o ponto crítico conduziam a um valor de  $D = 7.81$ . Nos outros detalhes o valor de D calculado era inferior a 1.

Procedeu-se à modificação do design da cisterna para diminuir o nível de tensões no ponto em análise de modo a que  $D = 1$ .

#### 4. CONCLUSÕES

A análise numérica de estruturas recorrendo ao método dos elementos finitos juntamente com a análise experimental de tensões permitiu efectuar a verificação da resistência à fadiga de uma estrutura soldada complexa sujeita a espectros de carga complexos.

#### 5. REFERENCES

- [1] - BS 8118, Draft British Standard BS8118 code of practice for the design of aluminium structures.
- [2] - J. Paulowski, Vehicle Body Engineering, Business Books, Ltd, London, 1969.
- [3] - J. Fenton, Vehicle body layout and analysis. Mechanical Engineering Publications, Ltd, 1980
- [4] - C. Moura Branco, A. A. Fernandes, P. T. de Castro, Fadiga de estruturas soldadas. Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.
- [5] - J. Silva Gomes, Ensaio de análise experimental de numa cisterna autoportante - 1º protótipo. Relatório INEGI no 910807 AET/01
- [6] - BS PD 6493 - 1991, Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welding structures.
- [7] - R. Clough J. Penzien, Dynamics of structures. McGrawHill

#### Agradecimentos

A Análise experimental de tensões foi efectuada pelo Prof. J. Silva Gomes e os seus colaboradores do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental do Departamento INEGI-FEUP.

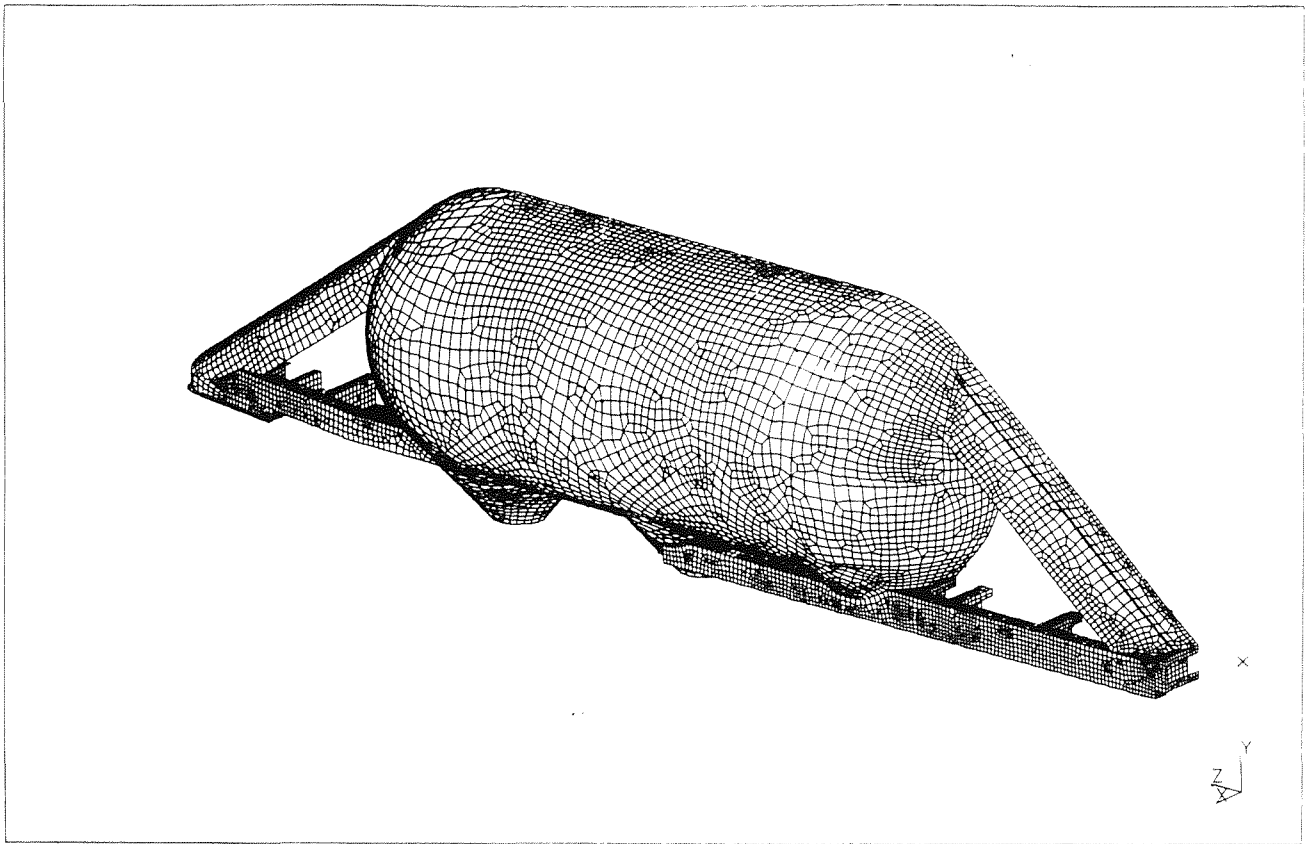


Figura 1 - Modelo da cisterna

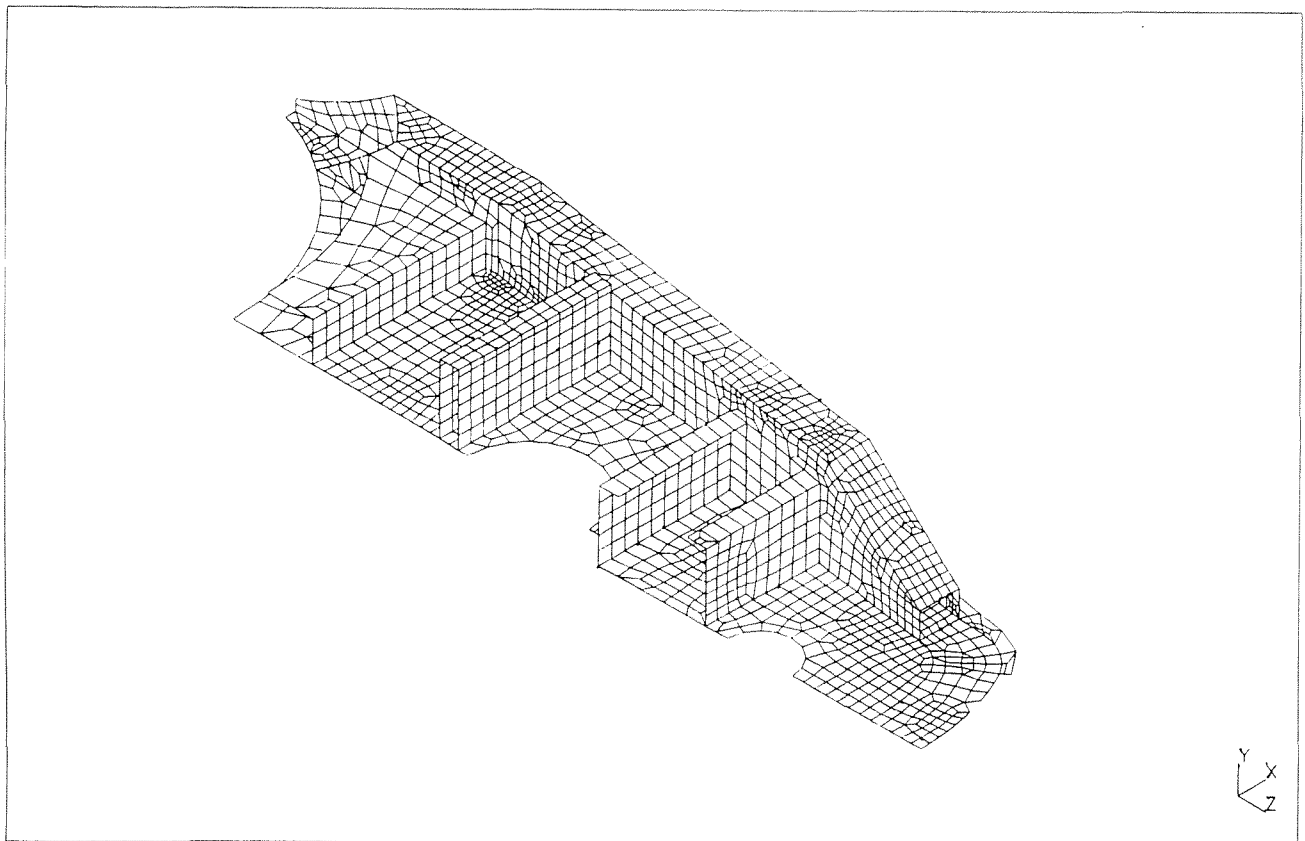


Figura 2 - Modelo de parte dos chassis

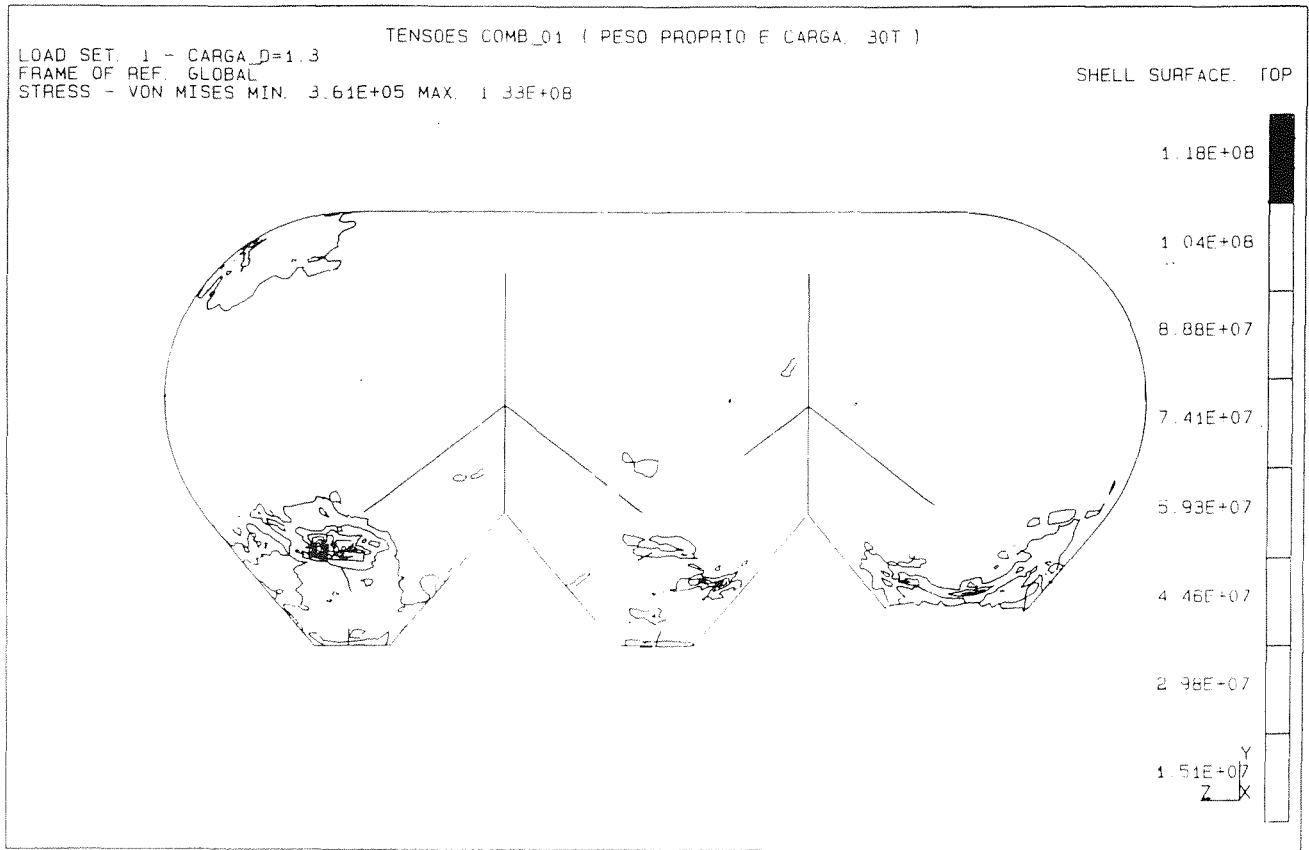


Figura 3 - Estado geral de tensões no reservatório

Roseta 82

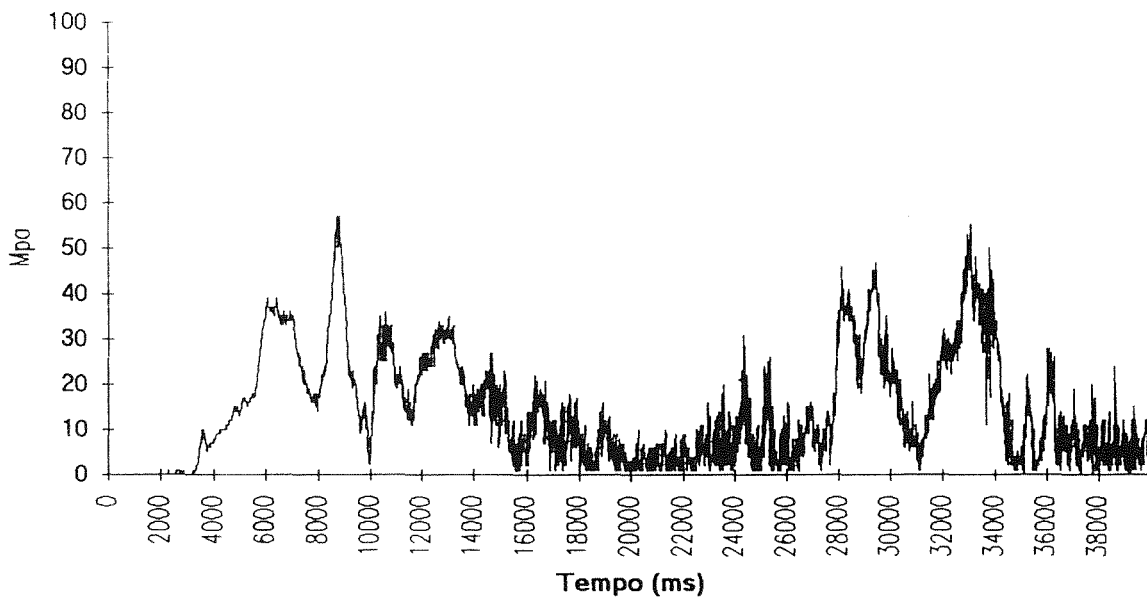


Figura 4 - Espectro real de carga

Frecuencias Absolutas

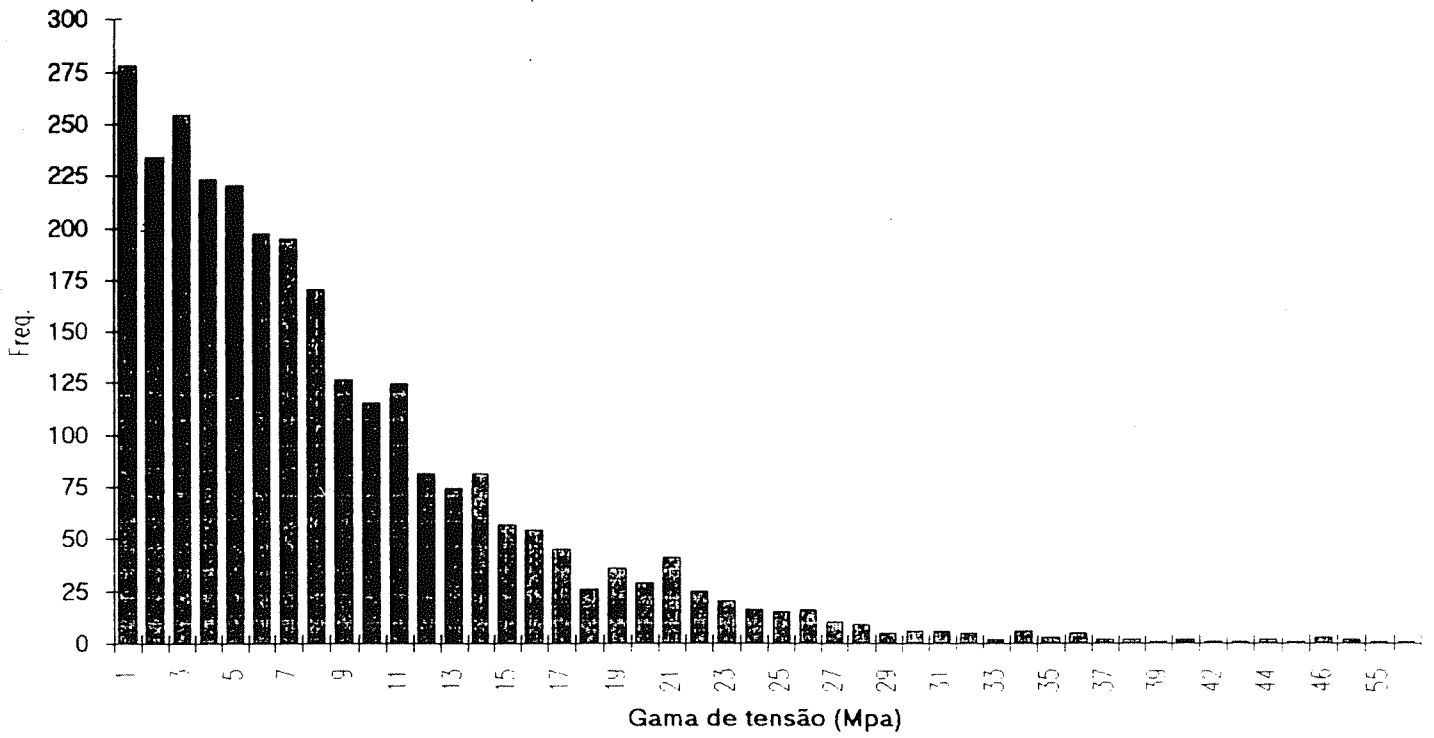


Figura 5 - Histograma das solicitações após contagem dos ciclos

Frecuencias Relativas

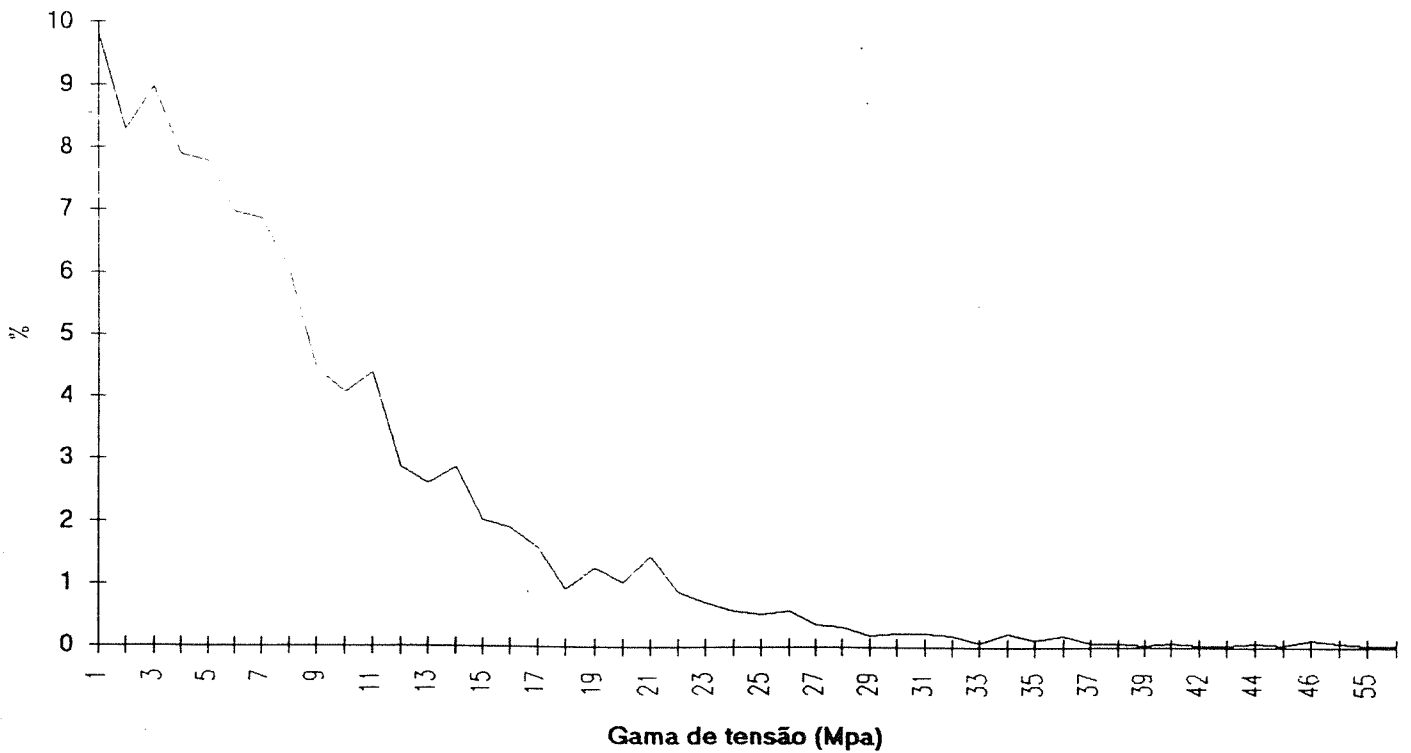


Figura 6 - Função de densidade de probabilidade de ocorrências