

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

SOUZA

CONFIABILIDADE DE EIXOS PRÉ-TENSIONADOS  
AXIALMENTE SUBMETIDOS A FLEXÃO ROTATIVA

08/90

CAMPINAS, 31 DE JANEIRO DE 1990

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

**CONFIABILIDADE DE EIXOS PRÉ-TENSIONADOS AXIALMENTE  
SUBMETIDOS A FLEXÃO ROTATIVA**

Este exemplar corresponde à Redação final da  
tese defendida por Marcos Sívio de Souza, e apro-  
vada pela Comissão Julgadora em 31/01/90.

Carlos Altemir

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

TESE DE MESTRADO


CONFIABILIDADE DE EIXOS PRÉ-TENSIONADOS AXIALMENTE  
SUBMETIDOS A FLEXÃO ROTATIVA

Autor: Marcos Sávio de Souza

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi

Aprovado por:

  
Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi, Presidente

  
Prof. Dr. João Plaza

  
Prof. Dr. Fausto Rodrigues Filho

CAMPINAS, 31 DE JANEIRO DE 1990

6663010399

A minha esposa,  
                  Josimeire.

A minha filha,  
                  Marianna.

## ABSTRACT

Theoretical and experimental analysis of the correlations between the applied stresses with or without prestress, and the life based on the number of cycles up to the failure by fatigue, in shaft submitted to rotative bending and variable loads. Experimental determination of characteristic parameters of the Reliability of the components based on Weibull's equation and analysis of its variation related to the applied loads.

Presentation of methodology to characterize the fatigue by the theory of Reliability allowing a complete utilization of the statistical design, referred to a expected life, and Reliability Index of the components.

By the use of a compression prestress, it was proved that it occurs a significative increase in the life of shafts submitted to variable loads in rotative bending.

Working only in a compression mode, it can be determined the necessary conditions for a quasi-infinite life of the components that provides important economical, operational and security advantages to the design.

## RESUMO

Análise teórica e experimental das correlações entre as tensões aplicadas, com ou sem pré-tensão, e a vida baseada no número de ciclos até falha por fadiga, em eixos submetidos a flexão rotativa e cargas variáveis. Determinação experimental dos parâmetros característicos da Confiabilidade, baseados na equação de Weibull, e análise de sua variação em função das cargas aplicadas.

Proposição de uma metodologia para caracterização da fadiga pela teoria da Confiabilidade, de modo a permitir a plena utilização do projeto estatístico, referido a uma dada vida prevista e índice de Sobrevivência (taxa de falhas) dos componentes.

A utilização de pré-tensão de compressão comprovou que ocorre um significativo aumento da vida em eixos submetidos a cargas variáveis em flexão rotativa, quando existe um correto balanceamento das tensões. Atuando apenas em faixas de compressão pode-se determinar as condições necessárias para uma vida quase infinita dos componentes de grandes implicações econômica

## AGRADECIMENTOS

Ao término deste trabalho, gostaríamos de agradecer às seguintes pessoas e entidades:

Prof. Dr. Carlos Amadeu Pallerosi, pela orientação e amizade dedicada ao longo dessa jornada:

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini, Diretor do Centro de Tecnologia da UNICAMP, pelo empréstimo de equipamentos:

FUNCAMP, pelo financiamento e compra de materiais:

Prof. Newton Damásio de Paula Santos, ex-Diretor da FEI/FUNREI, pela confiança e incentivo depositada:

Prof. Reinaldo Fernandino, Chefe do departamento de Mecânica da FUNREI, pelo afastamento concedido:

Prof. Frederico Ozanan Neves, pelas valiosas contribuições dadas a esse trabalho:

Aos amigos, Auteliano, Carlos, Celso, Italo, Mário, Toninho e Vicente, pela sincera amizade demonstrada durante o nosso convívio:

Extendemos ainda esses agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de forma decisiva para a realização deste trabalho.

## INDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos	1
1.2 - Justificativas	1
1.3 - Descrição do trabalho	2
CAPÍTULO 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS SOBRE FADIGA	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - Definição	4
2.3 - Ciclos de tensões	4
2.4 - Curva S N	6
2.5 - Espalhamento dos resultados	6
2.6 - Efeito da tensão média ( $S_m$ ) na vida da Fadiga	8
2.7 - Métodos mecânicos para se determinar o desempenho em Fadiga	9
2.7.1 - Método de aplicação de cargas compressivas no sentido axial	9
CAPÍTULO 3 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA CONFIABILIDADE	11
3.1 - Introdução	11
3.2 - Definição	11
3.3 - Equação Geral da Confiabilidade	11
3.4 - Equação da Confiabilidade para uma distribuição de Weibull	14
3.5 - Distribuição de Weibull para pontos alinhados	15
3.6 - Cálculo da percentagem acumulada de falha	15
3.7 - Distribuição de Weibull para pontos desalinhados	17
CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
4.1 - Especificação do material	19
4.1.1 - Corpos de prova	19
4.1.2 - Preparação dos corpos de prova	20
4.2 - Ensaio dos corpos de prova	21
4.2.1 - Ensaio dos corpos de prova sem pré-tensão	21
4.2.2 - Ensaio dos corpos de prova com pré-tensão	21
4.2.3 - Aplicação da carga de pré-tensão	22



4.3 - Equipamentos	23
4.3.1 - Máquina de flexão rotativa	23
4.3.2 - Sistema de aplicação de cargas	24
4.3.3 - Cálculo de tensão de flexão máxima aplicada em corpos com pré-tensão	28
4.4 - Dispositivo de medição de força	31
4.4.1 - Considerações gerais	31
4.4.2 - Justificativa do uso do dispositivo	31
4.5 - Aferição do torquímetro	32
4.6 - Aferição do parafuso tensor	37
4.7 - Levantamento da curva torque versus força axial	41
CAPÍTULO 5 - CURVAS DE VIDA SEM PRÉ-TENSÃO	44
5.1 - Introdução	44
5.2 - Resultados dos ensaios	44
5.3 - Observação sobre os resultados	47
CAPÍTULO 6 - CURVAS DE VIDA COM PRÉ-TENSÃO	49
6.1 - Introdução	49
6.2 - Resultados dos ensaios com o primeiro nível de pré-tensão	50
6.3 - Resultados dos ensaios com o segundo nível de pré-tensão	54
6.4 - Resultados dos ensaios com o terceiro nível de pré-tensão	58
6.5 - Comparação dos diferentes níveis de resistência	61
CAPÍTULO 7 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
7.1 - Introdução	63
7.2 - Determinação das constantes da equação de Weibull	63
7.3 - Resultados dos ensaios sem pré-tensão	63
7.4 - Resultados dos ensaios com o primeiro nível de pré-tensão	65
7.5 - Resultados dos ensaios com o segundo nível de pré-tensão	82
7.6 - Resultados dos ensaios com o terceiro nível de pré-tensão	82

7.7 - Determinação da vida $N_{10}$	93
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES	94
BIBLIOGRAFIA REFERIDA	96
APÊNDICES	99
A1 Simbologia	100
A2 - índices de Figuras	102
A3 - índices de Tabelas	103

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como seu objetivo estudar a vida de eixos metálicos pré-tensionados, submetidos à flexão rotativa, quando se varia a tensão média em compressão. A partir desses resultados, obter um parâmetro de vida com uma dada Confiabilidade, de modo que se tenha maior segurança no emprego desse tipo de elemento mecânico nas aplicações de engenharia. Por outro lado, verificar que uma conveniente pré-tensão de compressão pode levar uma vida quase-infinita, com uma confiabilidade (maior que 90%).

Adicionalmente, propor uma nova metodologia para ensaios de fadiga, baseada em critérios de confiabilidade, para permitir uma nova abordagem no dimensionamento de elementos de máquinas, por meio do "projeto estatístico", que atualmente está em grande desenvolvimento.

### 1.2 - JUSTIFICATIVAS

É notório que 90% das falhas de natureza mecânica se dá por fadiga. Dessa forma, qualquer aumento na vida afadiga pode vir a se tornar compensador na indústria manufatureira em geral. Por outro lado, um grande número de equipamentos mecânicos empregam eixos metálicos submetidos à flexão rotativa, como mostra a Figura 1.1. Além disso, os pesquisadores não têm dado atenção significativa ao estudo das falhas mecânicas desse tipo de

elemento submetido às condições referidas. Portanto esse trabalho se justifica na medida em que contribui com mais um elemento de estudo nessa área específica.

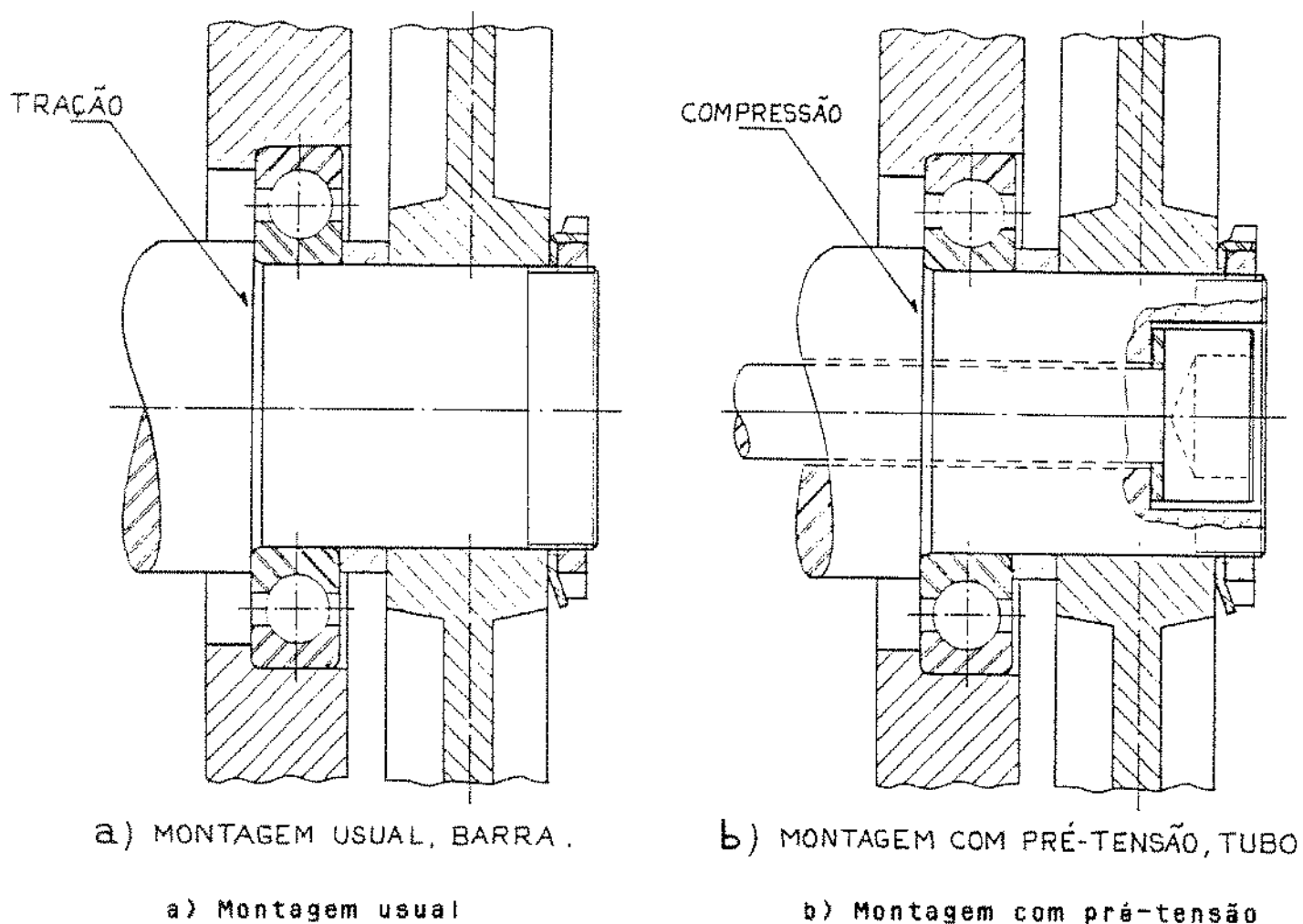


Figura 1.1

### 1.3 - DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta informações básicas sobre o fenômeno da Fadiga, de modo que o leitor possa entender os conceitos sobre Fadiga que são utilizados neste trabalho.

No capítulo 3 apresentam-se conceitos de Confiabilidade que são absolutamente necessários para a compreensão da segunda

parte desse trabalho, que é a determinação do índice de confiabilidade, denominado  $N_{10}$ .

O procedimento experimental é apresentado no capítulo 4 e faz uso de modelos estatísticos necessários para a aferição do instrumental utilizado e conceitos de Fadiga e Confiabilidade referidos nos capítulos 2 e 3 respectivamente.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos testes experimentais obtidos com corpos de prova não pré-tensionados. O capítulo 6 apresenta resultados de testes experimentais obtidos com corpos de prova pré-tensionados a diferentes níveis de tensão.

O capítulo 7 apresenta o tratamento dos dados experimentais, com base na teoria da confiabilidade, e determina os parâmetros necessários para se estabelecer níveis de confiabilidade, em particular o índice  $N_{10}$ .

No capítulo 8 estão contidas as discussões e conclusões a que se foi possível se chegar no âmbito deste trabalho.

## CAPÍTULO 2

### ASPECTOS FUNDAMENTAIS SOBRE FADIGA

#### 2.1 - INTRODUÇÃO

Os estudos das propriedades de fadiga dos materiais começaram 100 anos atrás, principalmente por causa das falhas ocorridas em equipamentos ferroviários [1]. Hoje, à medida que a tecnologia desenvolveu um número maior de equipamentos, tais como automóveis, aviões, turbinas, etc., sujeitos a carregamentos repetidos e vibrações, fazem-se necessários estudos que desenvolvam técnicas, que nos levem a uma melhor convivência com esse insidioso fenômeno. Nos dias atuais a fadiga se responsabiliza por aproximadamente 90% das falhas em serviços relativos a causas mecânicas [2].

#### 2.2 - DEFINIÇÃO

Segundo a ASTM - E 206 [3], a fadiga pode ser definida como um fenômeno de alteração estrutural permanente, localizada e progressiva, que ocorre em um material submetido a condições que produzem flutuações de tensões em alguns pontos e que podem culminar em trincas ou fraturas completas, após um número suficiente de flutuações.

#### 2.3 - CICLOS DE TENSÕES.

Um ciclo de tensão é a menor parte da função "tensão

-tempo", de modo periódico e identicamente repetida. A figura 2.1, mostra alguns tipos de ciclos de tensões. A tensão máxima ( $S_{max.}$ ) é o maior valor algébrico da tensão no ciclo, e a tensão mínima ( $S_{min.}$ ) é o menor valor algébrico. O intervalo de tensão ( $S_r$ ) é a diferença algébrica entre  $S_{max.}$  e  $S_{min.}$ ; amplitude de tensão alternativa ( $S_a$ ) é a metade de  $S_r$ ; a tensão média ( $S_m$ ) é a média algébrica entre  $S_{max.}$  e  $S_{min.}$ .

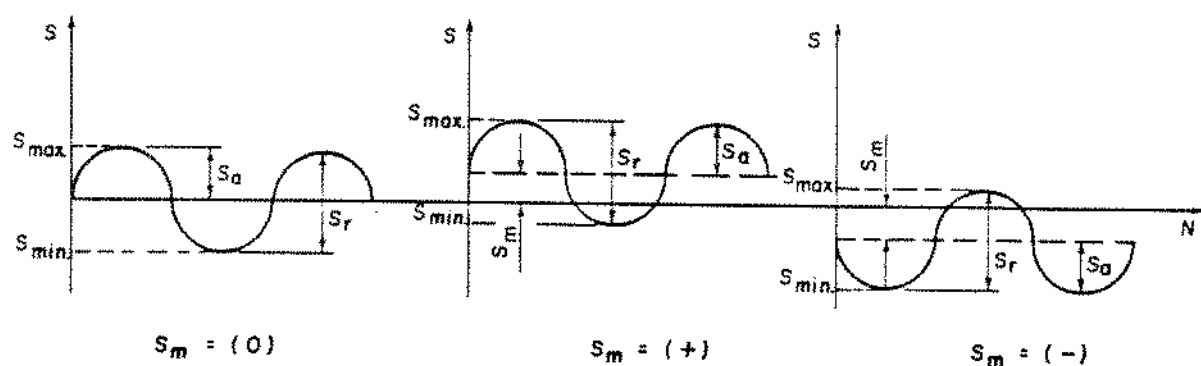


Figura 2.1 - Ciclos de tensões [4].

De acordo com as definições, podemos escrever:

$$S_r = S_{max.} - S_{min.} ; \quad (2.1)$$

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{max.} - S_{min.}}{2} ; \quad (2.2)$$

$$S_m = \frac{S_{max.} + S_{min.}}{2} \quad (2.3)$$

## 2.4 - CURVA S-N

O método básico para se apresentar os dados experimentais de fadiga é através da curva  $S - N$  [5], onde é lançada em gráfico a tensão  $S$  em relação ao número de ciclos necessários à fratura  $N$ . Pode-se construir esses gráficos de três modos, a saber:  $S \times N$ ,  $S \times \text{Log } N$  e  $\text{Log } S \times \text{Log } N$ . Para o caso de ensaio onde a tensão média é igual a zero, é comum o eixo das ordenadas ( $S$ ) vir a ser representado pela tensão máxima.

## 2.5 - ESPALHAMENTO DOS RESULTADOS

Experimentos [6,7] têm demonstrado que o espalhamento observado não é necessariamente causado pelo desajuste de equipamentos ou por técnicas deficientes aplicadas aos testes, mas por uma inerente característica do material. A resistência à fadiga de um pequeno volume elementar, difere da resistência de outro devido a fatores como: inclusões, diferenças no tamanho de grão, orientação, tensões internas, etc. Portanto, por esses e outros fatores, o espalhamento dos resultados não só existe no limite de fadiga do metal, como também em suas vidas finitas de fadiga.

Assim, para a vida em fadiga, costuma-se trabalhar com a vida média e o desvio-padrão dentro de níveis de confiança aceitáveis. Quando se apresenta sob a forma  $S \times \text{Log } N$ , a média e o desvio-padrão de acordo com Sinclair e Dolan [8], fica como se mostra a seguir:



$$\overline{\text{Log } N} = \frac{\sum \text{Log } N}{n} \quad (2.4)$$

$$\sigma = \left[ \frac{\sum (\text{Log } N - \overline{\text{Log } N})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

Onde :

$\overline{\text{Log } N}$  = Logarítimo médio da vida;

$N$  = vida de um dado corpo de prova;

$\sigma$  = desvio-padrão;

$n$  = número de corpos de provas sacrificados a cada nível de tensão.

Dos métodos para se determinar o limite de resistência à fadiga do corpo de prova ( $\overline{S}'$ ), o método da "escada", desenvolvido por Dixon e Mood [9], não envolve conceitos complicados da Estatística e não requer um grande número de corpos de provas. Inicialmente, ensaia-se um corpo de prova a uma tensão próxima do valor estimado do limite de resistência à fadiga para economia de tempo. Caso o corpo de prova se rompa, após atingir um número ( $N$ ) menor que 10 milhões de ciclos, diminui-se de um valor fixo ( $d$ ), que deve ser mantido constante no decorrer dos ensaios. Esse processo é seguido, sempre abaixando a tensão do mesmo valor, até conseguir uma tensão que não rompa o corpo de prova após  $10^7$  ciclos. A seguir, eleva-se novamente a tensão do mesmo valor fixo e prossegue-se ensaiando corpos de provas até conseguir outra vez uma tensão que rompa o corpo de prova. Atingido esse valor, decresce-se novamente a tensão, e procede-se assim até finalizar o número de corpos de provas. Conforme os autores do método, até 25 corpos de provas devem ser ensaiados dessa maneira "em escada". As equações (2.6) e (2.7) fornecem as fórmulas para o cálculo do limite de fadiga médio ( $\overline{S}'$ ) e o desvio-padrão ( $\sigma$ ).

$$\bar{S}'_o = S_o + d \cdot \left( \frac{N}{A} \pm 0,5 \right) , \quad (2.6)$$

$$\sigma = 1,620 \cdot d \cdot \left( \frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,29 \right) , \quad (2.7)$$

válido para a condição  $\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} > 0,3$  ,

onde:

$S_o$  = menor tensão ensaiada onde não ocorreu ruptura;

$d$  = incremento fixo, crescente ou decrescente;

$$A = \sum_{i=0}^k i \cdot n_i ; \quad N = \sum n_i ; \quad B = \sum_{i=0}^k i^2 \cdot n_i ;$$

$i$  = ordem numérica crescente, admitindo-se o nível mais baixo de tensão utilizado no teste igual a zero;

$K$  = ordem do nível mais alto de tensão utilizada no teste;

$n_i$  = número de corpos de provas rompidos em cada nível de tensão.

## 2.6 - EFEITO DA TENSÃO MÉDIA ( $S_m$ ) NA VIDA DA FADIGA

A maioria dos dados de fadiga existentes na literatura foram obtidos em condições de ciclos de tensões alternadas onde  $S_m = 0$  . Essa comodidade se dá pelo fato de que as máquinas utilizadas para os ensaios não permitem a variação da tensão média, pois, na prática, muitos componentes e estruturas estão sujeitas a tensões que variam entre diferentes valores de tensões de tração e compressão. Alguns autores [10 a 13] mostram através de experimentos especiais que a variação da tensão média influe de forma decisiva no limite de resistência do material.

Para resultados onde a tensão média ( $S_m$ ) é diferente de zero, permanecendo constante durante o ensaio, Dieter [5] sugere relacionar esses resultados em função de tensão alternada ( $S_a$ ) e número de ciclos até falha (N).

## 2.7 - MÉTODOS MECÂNICOS PARA SE DETERMINAR O DESEMPENHO EM FADIGA

Vários métodos de tratamentos superficiais são utilizados para se aumentar o desempenho em fadiga de componentes mecânicos. Estes métodos consistem basicamente em formar um espectro favorável de tensões residuais compressivas na superfície do corpo. O princípio para a criação dessas tensões superficiais, baseia-se em deformações plásticas superficiais que impedem as regiões elásticas adjacentes de uma recuperação elástica completa, para a condição de não-deformada. Assim, as regiões que foram deformadas plasticamente, ficam submetidas a um estado de compressão residual e as regiões que foram deformadas elasticamente, permanecem em estado de tração residual, afim de promover um balanço ao longo do corpo.

Os principais métodos práticos de introdução de tensões residuais compressivas favoráveis na superfície são: a) laminação superficial com cilindros especiais, usado especialmente para o caso de peças de grandes dimensões; b) o jato-percusão (shot-peening), que consiste no jateamento de partículas finíssimas de aço ou ferro fundido [14]. Este último processo, é utilizado principalmente em peças de pequeno porte, produzidas em série.

### 2.7.1- MÉTODO DE APLICAÇÃO DE CARGAS COMPRESSIVAS NO SENTIDO AXIAL

As máquinas de ensaios de fadiga existentes no mercado, em sua grande maioria não são feitas para o trabalho com tensões combinadas. A técnica utilizada para se conhecer, por exemplo, a

magnitude dos efeitos de cargas estáticas compressivas no sentido axial, necessita da criação de dispositivos especiais para que se conheça, primeiramente, a tensão de compressão aplicada. Estes dispositivos são constituídos de hastes ou parafusos que atravessam o centro do corpo que se deseja ensaiar, garantindo assim a tensão de compressão aplicada. Um inerente perigo na aplicação dessas tensões, é que uma acidental excentricidade da haste, cabo ou parafuso pode causar resultados indesejados. Afim de se evitar tais acidentes, deve-se usar estreitas folgas entre as partes, ou então, guias que garantam a concentricidade da carga.

Segundo resultados de testes da Douglas Aircraft Company [11], existem certas vantagens da aplicação da carga axial em relação a cargas radiais resultantes de tratamentos superficiais. Uma vantagem a ser destacada é que a resistência à fadiga de corpos axialmente comprimidos têm cerca de 25% a mais de vida, se comparado com corpos submetidos a jato-percussão. Precisa ser notado que as tensões sob carregamento axial são as mesmas, tanto no interior quanto na superfície, e que os efeitos do jato-percussão só é sentido na superfície. Portanto, em um corpo vazado tratado superficialmente por shot-peening, quando submetido à fadiga, a trinca poderá ter início na superfície interna do corpo, não satisfazendo assim, a melhoria esperada da vida em fadiga.

## CAPÍTULO 3

### ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA CONFIABILIDADE

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

Os avanços em técnicas de projetos para sistemas mecânicos e equipamentos, exigem cada vez mais desenvolvimentos aos aspectos determinísticos e probabilísticos e, consequentemente, uma melhoria da confiabilidade de milhares de novos equipamentos colocados à disposição do mercado. Desde 1965, o Laboratório da Universidade do Arizona tem conduzido pesquisas para se desenvolver metodologias que habilitam o projetista a projetar componentes mecânicos com Confiabilidades pré-estabelecidas [15 a 17]. A idéia básica da teoria da Confiabilidade é que um dado componente tem certa resistência que, se excedida, resultará numa falha desse componente. Portanto, se projetarmos um componente sabendo sua Confiabilidade para um determinado nível de tensão, estaremos certos do seu bom comportamento quando solicitado a esse nível de tensão.

#### 3.2 - DEFINIÇÃO

Segundo a Norma NBR 5462/81 [18], Confiabilidade  $C(t)$ , pode ser definida como a probabilidade de um produto comportar-se adequadamente, sob determinadas condições de operação, em um dado período de tempo.

#### 3.3 - EQUAÇÃO GERAL DA CONFIABILIDADE

A probabilidade de falha,  $F(t)$ , de um produto ou um

ítem, em um dado período de tempo é o complemento da Confiabilidade,  $G(t)$ , do mesmo ítem, ou seja, sua Desconfiabilidade. Desde que nenhuma outra alternativa seja possível e estes dois eventos forem mutuamente exclusivos, então,

$$G(t) + F(t) = 1 \quad (3.1)$$

Uma função importante de  $F(t)$  é sua derivada com relação ao tempo. Desde que  $F(t)$  seja uma probabilidade, sua derivada é uma função da distribuição de probabilidade, definida por:

$$f(t) = \frac{d F(t)}{dt} = - \frac{d G(t)}{dt} \quad (3.2)$$

ou seja, a probabilidade de falha durante o período de 0 a  $t$  é dada por:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (3.3)$$

A taxa de falha pode ser deduzida a partir destas expressões, considerando um teste que começa no instante  $t=0$  com  $N_0$  ítems sendo testados. Após um período de tempo  $t$ ,  $N_s$  sobreviverão e  $N_f = N_0 - N_s$  terão falhado. A velocidade segundo a qual os componentes falham é portanto:

$$\frac{d N_f}{dt} \quad (3.4)$$

A equação 3.4 pode ser interpretada como o número de componentes que falharam na unidade de tempo. Desde que existam  $N_s$  ítems sobreviventes em um ensaio, a taxa segundo a qual os componentes falham é:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s} \cdot \frac{d N_f}{dt} \quad (3.5)$$

A Confiabilidade no instante  $t$  pode ser expressa como a probabilidade de não ocorrer falhas no intervalo de 0 a  $t$ . Desde que  $N_s$  sobreviveram da população inicial  $N_o$ , a Confiabilidade pode ser equacionada pela proporção de sobreviventes, ou seja :

$$C(t) = \frac{N_s}{N_o} = 1 - \frac{N_f}{N_o} \quad (3.6)$$

Tomando-se a derivada, temos :

$$\frac{d C(t)}{dt} = - \frac{1}{N_o} \cdot \frac{d N_f}{dt} \quad (3.7)$$

ou então,

$$\frac{d N_f}{dt} = - N_o \cdot \frac{d C(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Substituindo (3.8) em (3.5), resulta :

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s} \cdot \left[ - N_o \cdot \frac{d C(t)}{dt} \right] \quad (3.9)$$

Substituindo a equação (3.6) em (3.9), a equação geral da Confiabilidade do item com o tempo de uso será :

$$\frac{d C(t)}{C(t)} = - \lambda (t) dt . \quad (3.10)$$

Integrando a equação (3.10), resulta :

$$- \int_0^t \lambda (t) dt = - \ln C(t). \quad (3.11)$$

Finalmente, a equação da Confiabilidade toma a seguinte forma,

$$C (t) = e^{-\int_0^t \lambda (t) dt} . \quad (3.12)$$

#### 3.4 - EQUAÇÃO DA CONFIABILIDADE PARA UMA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Para uma distribuição de Weibull, a taxa de falha  $\lambda (t)$  adquire a seguinte forma:

$$\lambda (t) = \frac{b}{e} \cdot \left[ \frac{N - \hat{a}}{e} \right]^{b-1} , \quad (3.13)$$

e a equação (3.12) toma a seguinte forma,

$$C (t) = e^{-\left[ \frac{N - \hat{a}}{e} \right]^b} , \quad (3.14)$$



onde:

- â = parâmetro de posição ou vida mínima;
- b = fator de forma;
- θ = fator de escala ou vida característica;
- N = número de ciclos.

### 3.5 - DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL PARA PONTOS ALINHADOS.

Quando temos um certo número de pontos amostrais, e estes adquirem uma forma linearizada no papel  $\ln \ln$  x  $\ln$ , também conhecido como papel de Weibull ou de Allan-Plait [19], na ordenada desse gráfico temos a percentagem acumulada de falhas  $F(t)$  e na abcissa o número de ciclos até falha, como mostrado na Figura 3.1.a. Através desse papel podemos achar as constantes  $\theta$  e  $b$ , pois, neste caso de pontos alinhados  $\hat{a} = 0$ , e a equação da Confiabilidade toma a seguinte forma:

$$G(t) = e^{-\left(\frac{N}{\theta}\right)^b}, \quad (3.15)$$

como mostrado na Figura 3.1.b

### 3.6 - CÁLCULO DA PERCENTAGEM ACUMULADA DE FALHA $F(t)$

A percentagem acumulada de falha  $F(t)$  pode ser calculada pelo grau médio, com suficiente precisão, aplicando-se a equação (3.15) ou usando-se as tabelas apresentadas na Norma ABNT.- NBR 8742/87 [20].

$$\text{Grau médio : } g_r = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.16)$$

onde :

$j$  = número de ordem da falha que se deseja calcular o grau médio ;  
 $n$  = quantidade de amostra.

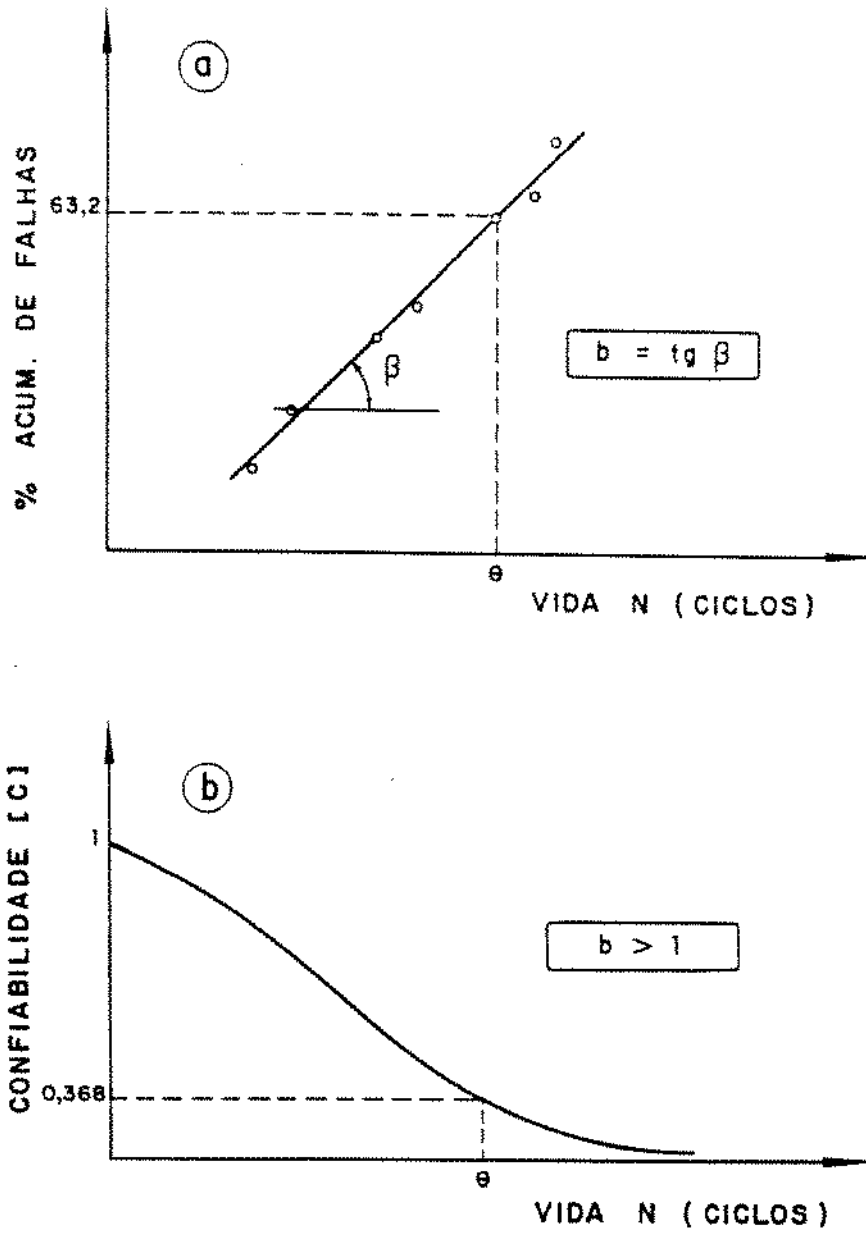


FIGURA 3.1

### 3.7 - DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL PARA PONTOS DESALINHADOS

Quando os pontos se distribuem em forma de curva, a NBR 9321 [21] recomenda locar os dados no Gráfico de Probabilidade de Weibull (GPW) da seguinte forma, como mostrado na Figura 3.2.

- a) Locar os dados na curva segundo a equação (3.16);
- b) Traçar duas linhas horizontais paralelas através dos pontos extremos, e uma terceira linha paralela às outras duas passando pelo ponto médio linear;
- c) Traçar três linhas perpendiculares ao eixo dos tempos a partir dos pontos de intersecção das três linhas horizontais com a curva;
- d) Identificar os valores do tempo " $t_i$ " com as três perpendiculares como segue:

$N_1$  = menor valor,  
 $N_m$  = valor médio,  
 $N_h$  = maior valor;

- e) Calcular o valor do parâmetro de posição " $\hat{a}$ " aplicando a seguinte fórmula:

$$\hat{a} = N_m - \frac{\left[ N_h - N_m \right] \cdot \left[ N_m - N_1 \right]}{\left[ N_h - N_m \right] - \left[ N_m - N_1 \right]} \quad ; \quad (3.17)$$

- f) Subtrair " $\hat{a}$ " (incluindo o seu sinal) de cada valor de " $N_i$ ";
- g) Realocar os dados. Agora os pontos devem aproximar-se de uma reta, ou seja, uma distribuição de Weibull das falhas deslocadas.

Para se estimar o parâmetro de forma,  $b$ , basta traçar uma reta paralela pelo ponto de referência até escala graduada do fator "b" que se situa na região superior do GPW, como será visto no capítulo 7.

A estimativa da vida característica ou fator de escala ( $\theta$ ) é igual ao valor da projeção no eixo das abcissas, do ponto de intersecção do grau médio igual a 63,2% com a reta, ou seja, quando  $N = \theta$ , a equação 3.15 toma a seguinte forma:

$$C = e^{-\left(\frac{N}{\theta}\right)^b} = e^{-1} = 0,368,$$

então

$$F = 1 - C = 1 - 0,368 = 0,632.$$

Isto significa que a vida característica ( $\theta$ ) representa o número de ciclos de vida para os quais 63,2% de todas as amostras falharão.

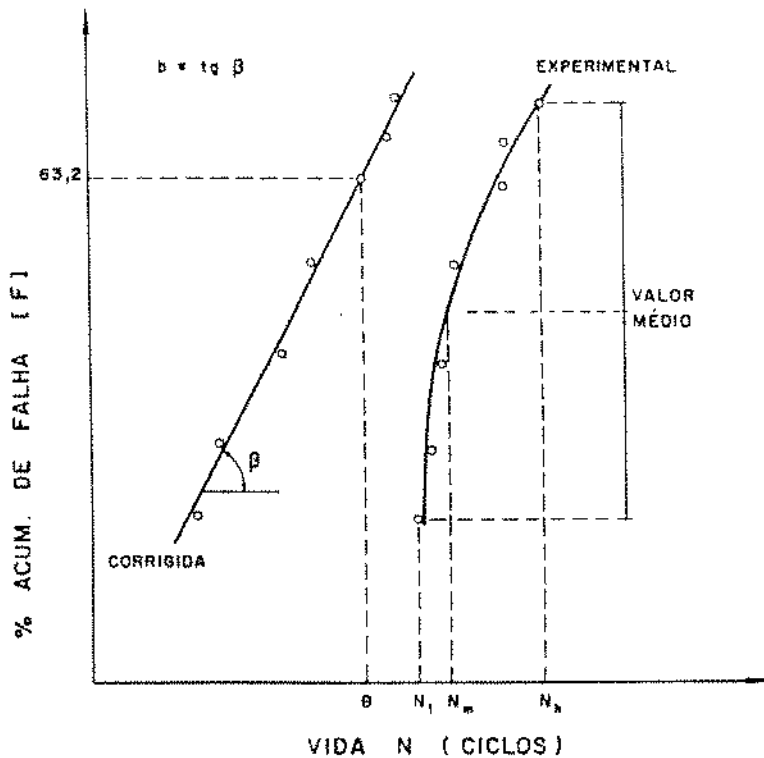


FIGURA 3.2

## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 4.1 - ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL

Para a confecção dos corpos de prova foram usados tubos de aço sem costura, trefilados a frio, tipo PPL-ABNT 1010 - NBR 8476/84 classe II, normalizado. O certificado de qualidade expedido pela MANNESMANN Comercial S/A, caracteriza o material conforme a tabela abaixo.

**TABELA 4.1** - Propriedades do material usado na confecção dos corpos de prova.

Composição Química		Propriedades Mecânicas
C	$9 \times 10^{-2}$	Limite de Escoamento 288 - 291 MPa
Mn	$44 \times 10^{-2}$	
P	$25 \times 10^{-8}$	Resistência a Tração 409 - 412 MPa
S	$29 \times 10^{-8}$	Alongamento % 40 - 41
SI	$32 \times 10^{-2}$	

#### 4.1.1 - CORPOS DE PROVA

Foram utilizados dois tipos de corpos de provas. O primeiro é um corpo normal conforme mostra a figura 4.1, porém o segundo, dito como corpo pré-tensionado, Figura 4.2, era acompanhado de uma haste com ambas extremidades roscadas e guias. As guias

garantem a concentricidade da haste, fazendo com que toda a carga de pré-tensão aplicada fique igualmente distribuída na área do tubo.

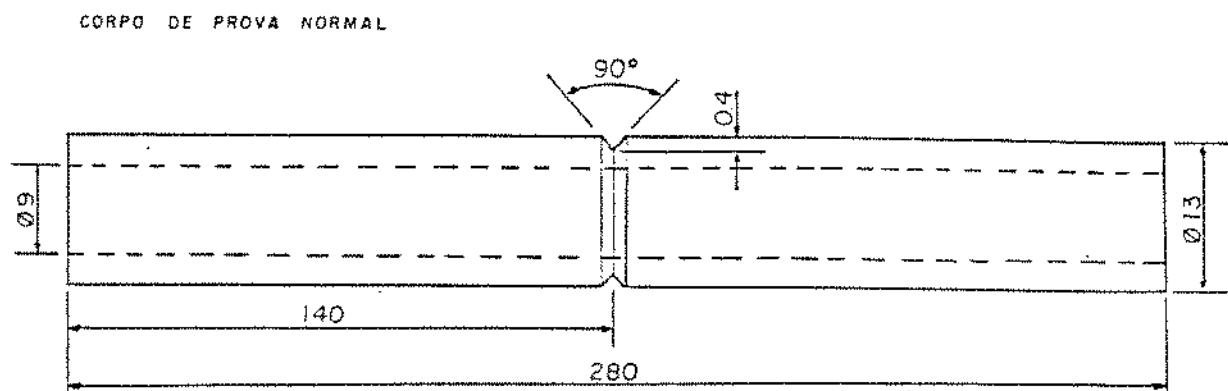


Figura 4.1 - Corpo de prova normal

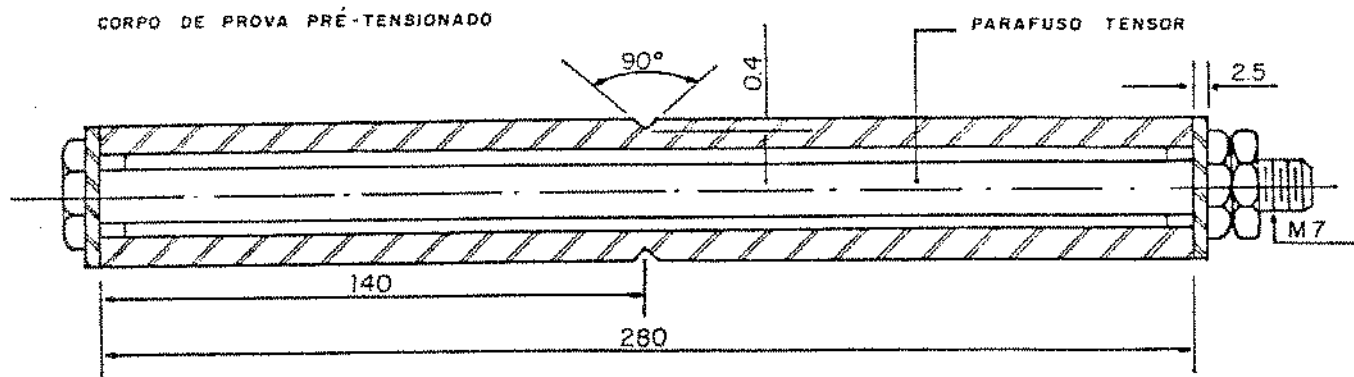


Figura 4.2 - Corpo de prova pré-tensionado

#### 4.1.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de provas foram cortados e acertados sob uma

cota de 280mm. Os entalhes foram feitos com um bits previamente calibrado, e sua profundidade controlada por um relógio comparador. Porém, devido à ovalização do tubo, a profundidade dos entalhes era posteriormente submetida a medições em um microscópio digital, em cinco diferentes pontos ao redor de seu diâmetro. Foi aceita como cota oficial a média dessas cinco medidas, com um desvio de 5% da referida cota.

Quanto ao acabamento superficial, não foi dado nenhum tratamento especial, já que o entalhe, devido a concentração de tensão, elimina a possibilidade do corpo romper em outra região.

#### 4.2 - ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA

##### 4.2.1 - ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA SEM PRÉ-TENSÃO

Os testes de fadiga foram conduzidos em seis diferentes níveis de tensões. Para cada nível foram sacrificados sete corpos de provas, sendo que os valores médios com 95% de confiança, foram obtidos estatisticamente conforme Sinclair (22). Para determinar o limite de fadiga  $\bar{S}_e$ , foi utilizado o método da escada (9), e, para tal, foram ensaiados dezoito corpos de provas.

##### 4.2.2 - ENSAIOS DOS CORPOS DE PROVA PRÉ-TENSIONADOS

Foram realizados três ensaios, e todos seguiram a mesma metodologia descrita no ítem anterior. Faz-se necessário ressaltar que cada ensaio foi desenvolvido sob diferentes cargas de pré-tensão.

#### 4.2.3 - APLICAÇÃO DA CARGA DE PRÉ-TENSÃO

A aplicação da referida carga foi feita através de um torquímetro, previamente calibrado, conforme montagem apresentada na Figura 4.3.

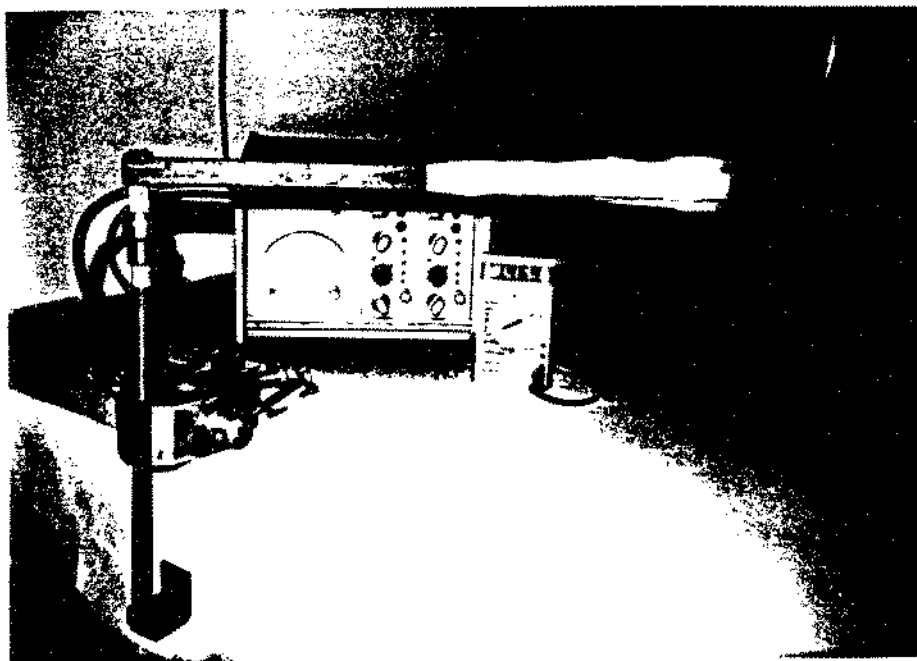


Figura 4.3 - Aplicação da carga no corpo de prova

#### 4.2.4 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Para uma desejada tensão, foi aplicado um torque que, devido à deformação dos extensômetros elétricos, podia ser lido na



ponte amplificadora um sinal L.

A força F referente a esse sinal, era conhecida através da curva de calibração, como apresentada no item 4.7.

#### 4.3 - EQUIPAMENTOS

##### 4.3.1 - MÁQUINA DE FLEXÃO ROTATIVA

Os ensaios foram efetuados em uma máquina de flexão rotativa marca METEFÉM TYP RM 506 com a seguinte composição:

- 1- motor de 3400 rpm;
- 2- contagiros;
- 3- capa protetora;
- 4- sistema de aplicação de carga;
- 5 - Volante de anulação de carga.

A fotografia da máquina em questão está representada na Figura 4.4.

O controle do número de ciclos até a ruptura é feito por um contagiros acoplado ao motor, o qual registra o número de ciclos até falha.

No momento exato em que ocorre a ruptura do corpo, a máquina é desligada automaticamente através de um dispositivo. Desse modo, o número registrado no contagiros é o número de ciclos até a ruptura (N).



Figura 4.4 - Máquina de ensaio de flexão rotativa

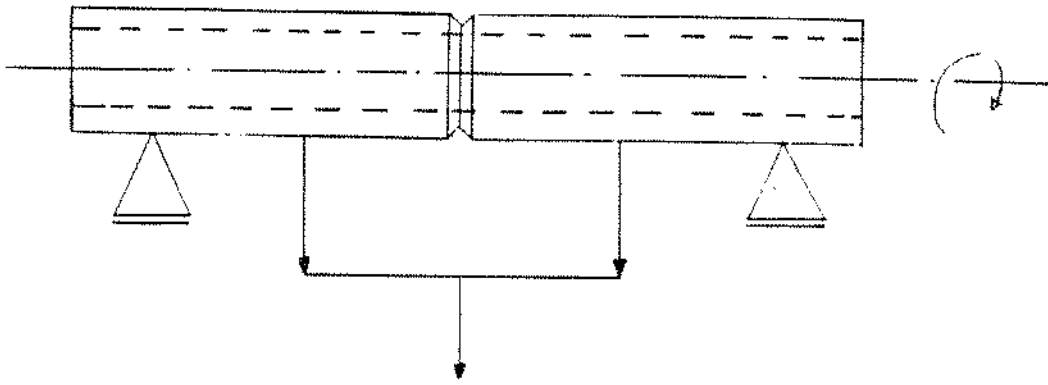
#### 4.3.2 - SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA

A máquina é dotada de um sistema de braços articulados, contrapeso e um prato de balança no qual são colocados pesos, que através da aplicação de um momento de flexão gera uma tensão máxima nas fibras externas do corpo de prova. O esquema da máquina é mostrado na Figura 4.6. Com o giro do corpo de prova ocorre uma alternância de tensões (tração e compressão).

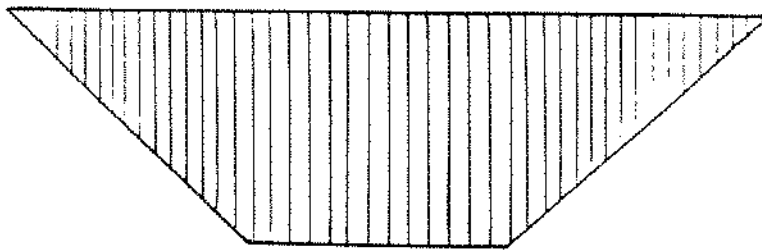
#### 4.3.3 - CÁLCULO DA TENSÃO DE FLEXÃO MÁXIMA APLICADA SEM PRÉ-TENSÃO

A Figura 4.5 exemplifica um corpo bi-apoiado, caso típico do ensaio da barreta rotativa.

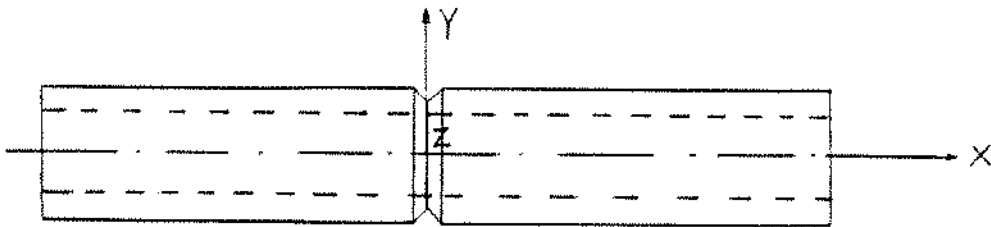
A) Aplicação da Força



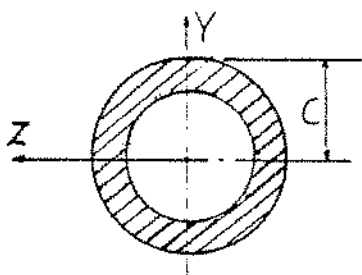
B) Diagrama do Momento Fletor



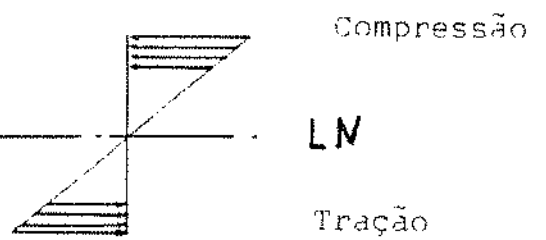
C) Corpo de Prova



D) Área da Secção



E) Distribuição das Tensões



Utilizando-se do esquema a seguir (figura 4.6), que representa as medidas da máquina usada para o ensaio, determina-se o valor da força  $F$ .

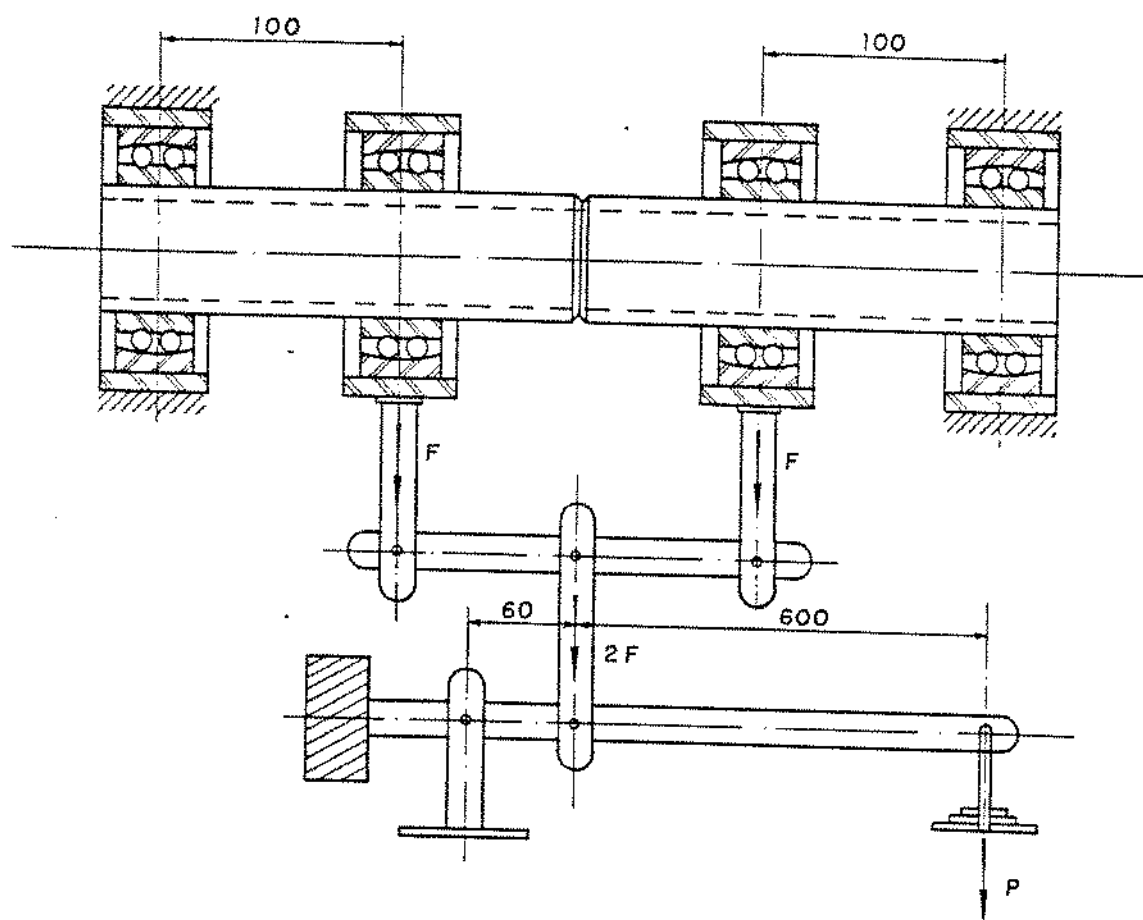


Figura 4.6 - Representação esquemática da máquina de ensaio

Para que o sistema fique em equilíbrio, é necessário a seguinte condição :

$$P \cdot 600 = 2 \cdot F \cdot 80$$

$$F = \frac{P \cdot 600}{120}$$

$$F = 5 \cdot P, \quad (4.1)$$

Com  $F = 5P$  e  $L = 0,1 \text{ m}$ , teremos o momento máximo igual a:

$$M = 5 \cdot 0,1 \cdot P$$

$$M = 0,5 \cdot P \text{ [Nm]}. \quad (4.2)$$

Segundo Shigley [23], a tensão máxima de flexão de um corpo submetido às condições da Figura 4.5.A é:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}, \quad (4.3)$$

onde:

$M$  = momento Fletor;

$c$  = distância da linha neutra à raiz do entalhe;

$I$  = momento de inércia.

O módulo de resistência à flexão ( $Z$ ) para uma coroa circular será,

$$Z = \frac{I}{c} = \frac{\pi \cdot (d^4 - d_i^4)}{32 \cdot d} \quad (4.4)$$

Substituindo-se as equações 4.2 e 4.4 na equação 4.3 tem-se a tensão máxima aplicada em um tubo submetido à flexão rotativa,

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{32 \cdot d \cdot 500 \cdot P}{\pi \cdot (d^4 - d_i^4)}, \quad (4.5)$$

onde:

$P$  = carga aplicada ao corpo;

$d$  = diâmetro da raiz do entalhe;

$d_i$  = diâmetro interno.

#### 4.3.4 - CÁLCULO DA TENSÃO DE FLEXÃO MÁXIMA APLICADA COM PRÉ-TENSÃO

Faz-se necessário, agora, analisar o corpo sujeito à ação simultânea de cargas de flexão e axial. Um caso simples dessa espécie é analisado por Timoshenko [24], conforme mostra a figura 4.7, a seguir:

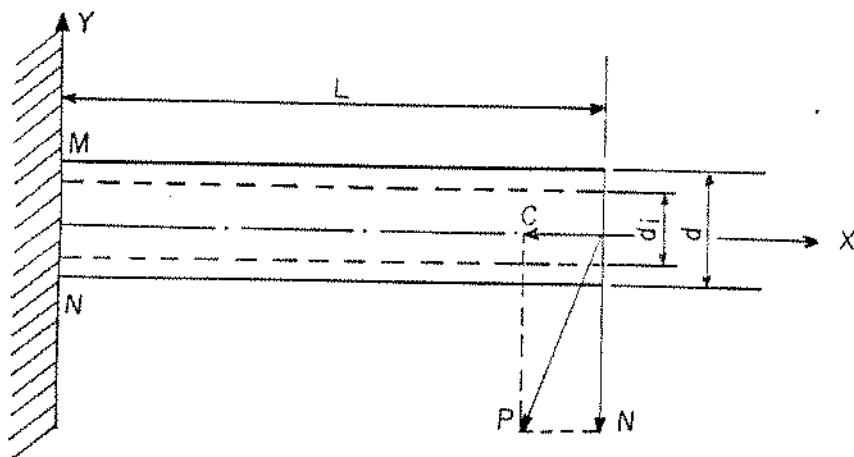


Figura 4.7 - Estudo de um corpo sujeito à flexão e tração

A força inclinada  $P$  é decomposta numa componente transversal  $N$  e uma axial  $C$ . Admite-se que o corpo fique isento de deformação, quando se considera a tensão de compressão devido à força  $C$ . A tensão resultante em qualquer ponto é obtida pela superposição da tensão de compressão devido à força  $C$ , com tensão de flexão produzida pela carga  $N$ . A tensão de compressão devido à força  $C$  é constante ao longo do tubo e igual à  $C/A$ , onde  $A$  é a área da seção transversal. A tensão de flexão depende do momento, que cresce desde zero na extremidade livre até o valor máximo na extremidade engastada. Portanto, para um ponto distante de  $y$  do eixo  $z$ , resulta:

$$\sigma_x = \frac{-N \cdot L \cdot Y}{I_z} - \frac{T}{A} \quad (4.6)$$

Para uma secção circular oca, segue que

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_i^2) \quad (4.7)$$

$$I_z = \frac{\pi}{64} \cdot (d^4 - d_i^4) \quad (4.8)$$

$$M = N \cdot L \quad (4.9)$$

Substituindo-se as equações (4.7), (4.8) e (4.9) na equação (4.6) resulta a tensão de compressão máxima em N e de tração em M, como segue:

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{M}{\frac{\pi}{32} \cdot d \cdot (d^4 - d_i^4)} - \frac{T}{A} \quad (4.10)$$

Assim sendo, a equação de tensão máxima para corpos de provas com pretensão em compressão será,

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{16 \cdot d \cdot P}{\pi \cdot (d^4 - d_i^4)} - \frac{T}{A} \quad (4.11)$$

onde:

$$\frac{T}{A} = \text{pré-tensão aplicada ao corpo.}$$

Os valores de cargas e tensões, a serem adotados no ensaios de vidas, são apresentados na tabela 4.2.

TABELA 4.2 - Níveis de tensões utilizadas nos ensaios

Sem pr-tensão		Tensões Geradas													
		1º nível de pr-tensão				2º nível de pr-tensão				3º nível de pr-tensão					
		Tensão (MPa)		Carga axial (TCN)	Pr tensão $S_m$ (MPa)	Tensão (MPa)		Carga axial (TCN)	Pr-tensão $S_m$ (MPa)	Tensão (MPa)		Carga axial (TCN)	Pr-tensão $S_m$ (MPa)	Tensão (MPa)	
$S_{max}$	$S_{min}$	$S_{max}$	$S_{min}$			$S_{max}$	$S_{min}$			$S_{max}$	$S_{min}$				
$P_1$	61,0	+210	-210	2200	- 41,3	+ 188,7	- 251,3	2880	- 53,7	+ 156,3	- 263,7	2200	- 66,0	+ 144,0	- 276,0
$P_2$	55,2	+190	-190	2200	- 41,3	+ 149,7	- 231,3	2880	- 53,7	+ 136,3	- 243,7	2200	- 66,0	+ 124,0	- 256,0
$P_3$	52,3	+180	-180	2200	- 41,3	+ 138,7	- 221,3	2880	- 53,7	+ 126,3	- 233,7	2200			
$P_4$	46,5	+160	-160	2200	- 41,3	+ 118,7	- 201,3								
$P_5$	43,6	+150	-150												
$P_6$	40,7	+140	-140												



## 4.4 - DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE FORÇA

### 4.4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para medir a força axial atuante no parafuso tensor, após este ter sido submetido a um determinado torque, foi construído um dispositivo conforme mostra a Figura 4.8. O dispositivo consiste de um tubo de aço, com uma das extremidades cônica até o diâmetro de 13mm, onde se dá o apoio da porca.

O parafuso, com os extensômetros já colados, foi colocado no interior do dispositivo, ficando com a cabeça apoiada ao fundo, e a extremidade roscada em cima através da porca.

Portanto, ao variarmos o torque de zero até, por exemplo, 10 Nm, o parafuso também seria tracionado de zero até a força correspondente a esse torque.

### 4.4.2 - JUSTIFICATIVA DO USO DO DISPOSITIVO

Dos métodos diretos e indiretos de se medir pré-cargas em juntas aparafusadas, os métodos diretos, como, por exemplo, medição do alongamento do parafuso, deformação da peça intermediária e uso de extensômetros, são os mais indicados por oferecerem maior fidelidade da força axial atuante no sistema.

Blacke e Kurtz [25] mostram em seus experimentos que existe uma diferença entre a força real e a força correspondente ao torque medido. O atrito, seja dos filetes da rosca ou da superfície da peça intermediária com a superfície da porca, é o principal responsável por essa diferença.

#### 4.5 - AFERIÇÃO DO TORQUÍMETRO

Após a colagem dos extensômetros na região de medida, foi determinada a curva de aferição do torquímetro, a qual indica a relação existente entre as leituras das deformações dos extensômetros elétricos na ponte amplificadora, e os valores das cargas aplicadas no dispositivo.

A aferição do torquímetro foi feita através de peso morto, (figura 4.9), os quais foram previamente aferidos.

Os pares de valores  $F$  (cargas aplicadas no torquímetro em N) versus  $L$  (leitura da deformação dos extensômetros elétricos em Volts), se encontram registrados na tabela 4.3.

O valor da cota da ponta do torquímetro à extremidade onde foram fixados os pesos, mede 0,5 m.

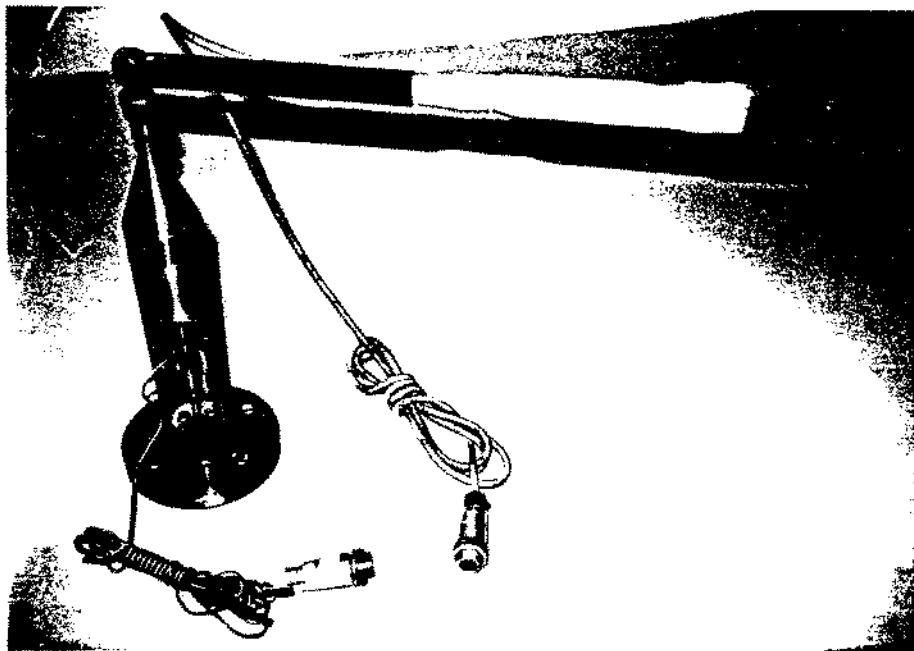


Figura 4.8 - Dispositivo de medição de força.

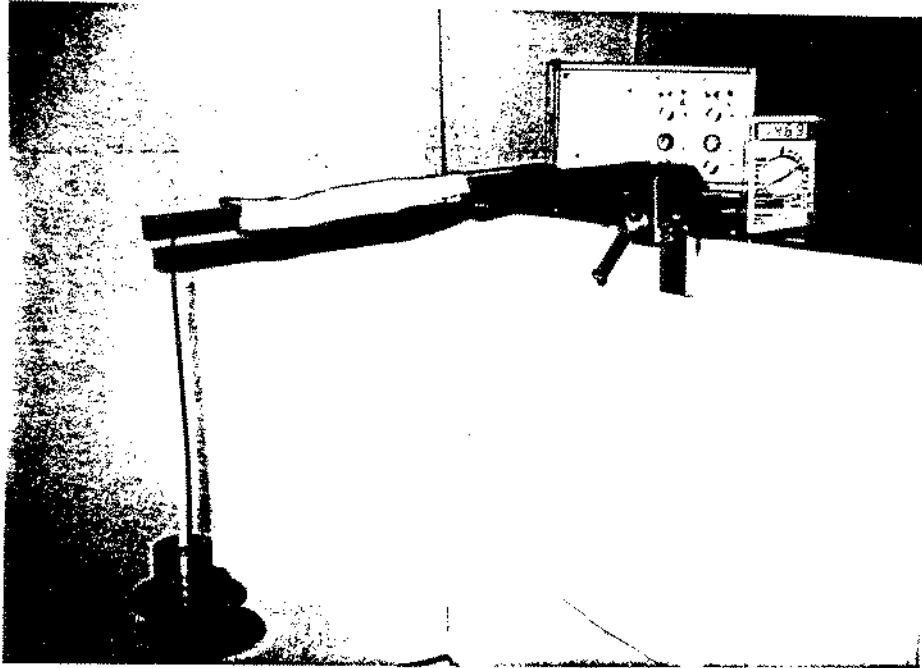


Figura 4.9 - Aferição do torquímetro

TABELA 4.3 - Valores das leituras das deformações conforme aplicação das cargas.

CARGA (N)	Leituras L (volts)				
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
1,00	0,101	0,100	0,099	0,100	0,100
2,00	0,201	0,201	0,200	0,200	0,200
3,00	0,304	0,303	0,302	0,303	0,303
4,00	0,404	0,404	0,405	0,405	0,403
6,00	0,605	0,607	0,605	0,606	0,605
8,00	0,807	0,808	0,807	0,808	0,807
10,00	1,011	1,010	1,010	1,010	1,009
12,00	1,214	1,212	1,212	1,212	1,211
14,00	1,417	1,415	1,415	1,415	1,414
16,00	1,618	1,618	1,618	1,618	1,617
18,00	1,821	1,821	1,821	1,825	1,821
20,00	2,029	2,025	2,024	2,025	2,024
23,00	2,335	2,330	2,329	2,330	2,328
26,00	2,649	2,637	2,637	2,635	2,635
27,00	2,754	2,741	2,738	2,741	2,738

A fim de traçarmos uma reta que exprima a curva de aferição do torquímetro, utilizaremos o método dos mínimos quadrados [26] para uma regressão linear.

$$Y = A + B \cdot X .$$

Fazendo,  $Y = L$  e  $X = F$  teremos a equação da leitura versus força aplicada na extremidade do torquímetro.

$$L = A + B \cdot F .$$

Os valores de  $A$  e  $B$  são conhecidos resolvendo-se o seguinte sistema.

$$\begin{cases} \sum \bar{L} = A \cdot n + B \cdot \sum F . \\ \sum \bar{L} \cdot F = A \cdot \sum F + B \cdot \sum F^2 . \end{cases}$$

Segundo Fillier [27 ],

$n$  = número de cargas aplicadas ;

$\sum F$  = somatório das cargas aplicadas ;

$\sum \bar{L}$  = somatório das médias das leituras ;

$A$  = coeficiente linear da reta ;

$B$  = coeficiente angular da reta .

Estes valores estão computados na Tabela 4.4. Após resolver-se o sistema tem-se a seguinte equação, para um nível de confiança de 95% :

$$L = -0,0034 + 0,10015 F$$

TABELA 4.4 - Valores de cargas e leituras tratadas estatisticamente.

n	F (N)	$\bar{L}$ (V)	$\bar{L} \cdot F$	F <sup>2</sup>	$\bar{L}^2$
1	1,00	0,100	0,10	1,00	0,010
2	2,00	0,201	0,40	4,00	0,040
3	3,00	0,303	0,91	9,00	0,092
4	4,00	0,404	1,61	16,00	0,163
5	6,00	0,606	3,64	36,00	0,367
6	8,00	0,807	6,48	64,00	0,651
7	10,00	1,010	10,10	100,00	1,020
8	12,00	1,212	14,54	144,00	1,469
9	14,00	1,415	19,81	196,00	2,002
10	16,00	1,618	25,88	256,00	2,618
11	18,00	1,822	32,80	324,00	3,320
12	20,00	2,025	40,50	400,00	4,101
13	23,00	2,330	53,59	529,00	5,429
14	26,00	2,639	68,61	676,00	6,964
15	27,00	2,742	74,03	729,00	7,519
$\Sigma$	190,00	19,234	352,99	3484,00	35,765

Para que possamos montar a curva de calibração (Fig 4.10) encontramos a equação da reta inversa, que relaciona a força aplicada na extremidade do torquímetro com os sinais obtidos na ponte amplificadora.

$$F = 12,7 + 9,862 \cdot ( L - 1,28 )$$

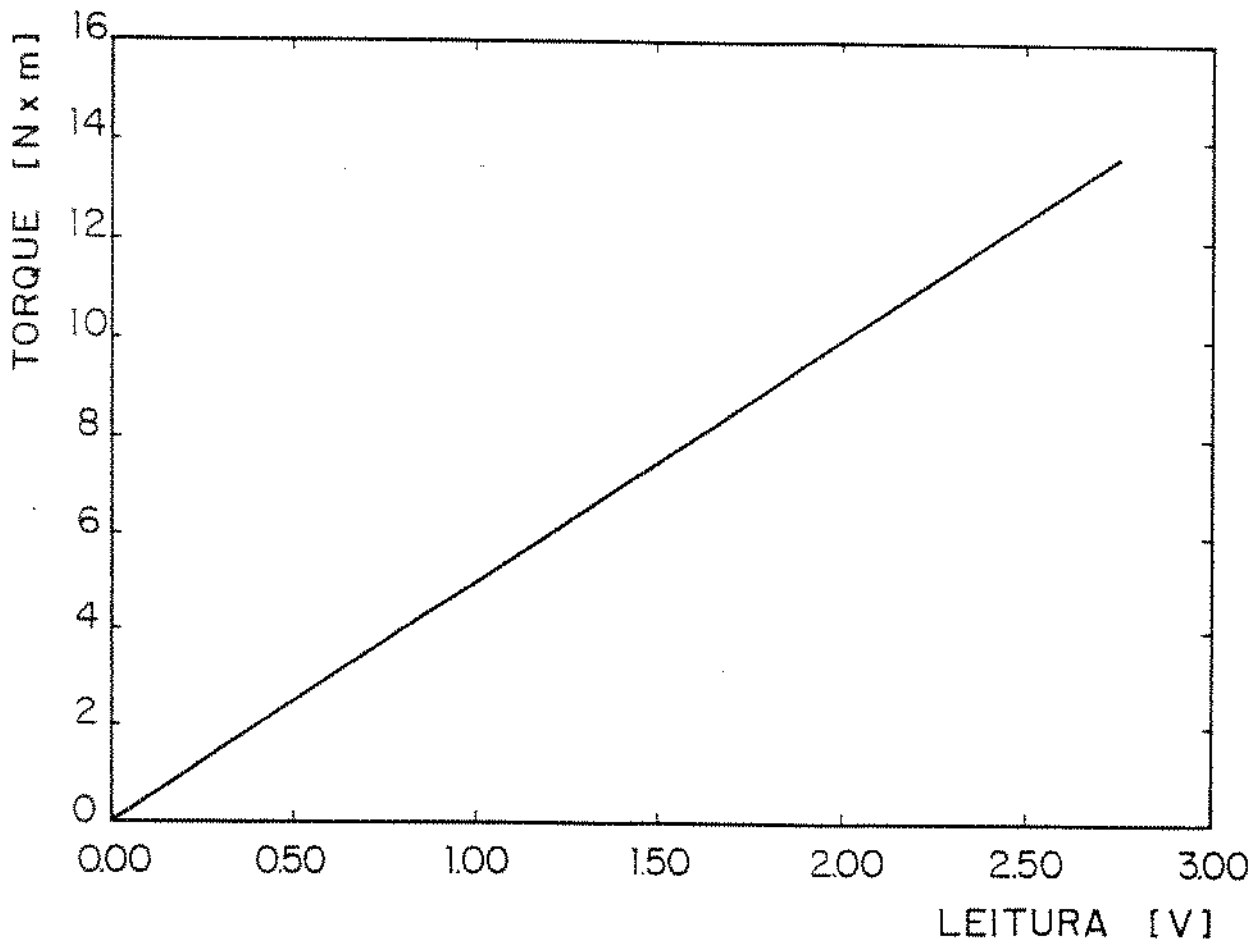


Figura 4.10 - Curva de calibração do torquímetro

#### 4.6 - AFERIÇÃO DO PARAFUSO TENSOR

Após a colagem dos extensômetros, o parafuso tensor (ver Figura 4.2) foi submetido a cargas axiais em uma máquina de tração, conforme mostra a Figura 4.11, já que não é possível aplicá-las através de peso morto. As cargas variaram de 500 a 10000 N, ficando portanto, abaixo do limite de escoamento.

Os pares de valores F (cargas aplicadas no parafuso em N) e L (leituradas da deformação dos extensômetros elétricos na ponte amplificadora em Volts) se encontram registrados na tabela 4.5.

A reta que exprime a curva de aferição do parafuso (Fig. 4.12) foi conseguida utilizando-se o mesmo método utilizado na aferição do torquímetro.

Os valores de  $\sum F$ ,  $\sum L$ ,  $\sum L \cdot F$ ,  $\sum F^2$ ,  $\sum L^2$ , estão computados na tabela 4.6, para um nível de confiança de 95%.

Para este caso, o sistema fica da seguinte forma:

$$\begin{cases} 25,054 = 20 A + 105000 B \\ 172200 = 105000 A + 717500000 B \end{cases}$$

onde  $A = - 0,0314$  e  $B = 0,02446$ . Assim sendo, as equações tomam as seguintes formas.

$$L = - 0,0314 + 0,02446 F$$

$$F = 5250 + 4088,7 ( L - 1.253 ) .$$

TABELA 4.5 - Valores das leituras das deformações conforme aplicação das cargas.

Cargas (N)	Leituras L (volts)				
	1 <sup>ª</sup>	2 <sup>ª</sup>	3 <sup>ª</sup>	4 <sup>ª</sup>	5 <sup>ª</sup>
500	0,108	0,105	0,116	0,108	0,115
1000	0,202	0,192	0,195	0,197	0,181
1500	0,341	0,338	0,333	0,339	0,334
2000	0,462	0,461	0,453	0,454	0,453
2500	0,575	0,577	0,577	0,573	0,577
3000	0,707	0,709	0,707	0,706	0,694
3500	0,812	0,829	0,821	0,830	0,822
4000	0,951	0,949	0,946	0,937	0,943
4500	1,062	1,067	1,066	1,072	1,061
5000	1,181	1,195	1,180	1,1930	1,194
5500	1,314	1,316	1,316	1,322	1,318
6000	1,443	1,443	1,439	1,445	1,442
6500	1,560	1,558	1,554	1,565	1,556
7000	1,689	1,689	1,686	1,693	1,689
7500	1,797	1,799	1,798	1,793	1,797
8000	1,933	1,931	1,932	1,940	1,932
8500	2,052	2,052	2,051	2,054	2,055
9000	2,168	2,167	2,159	2,168	2,162
9500	2,298	2,291	2,287	2,299	2,293
10000	2,409	2,406	2,397	2,411	2,414



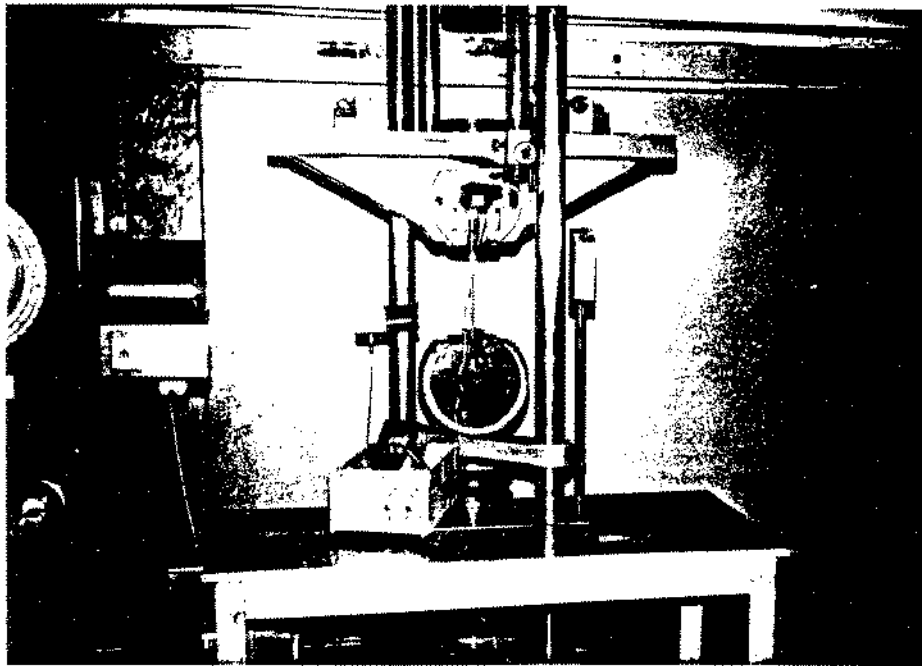


Figura 4.11 - Aferição do Parafuso Tensor

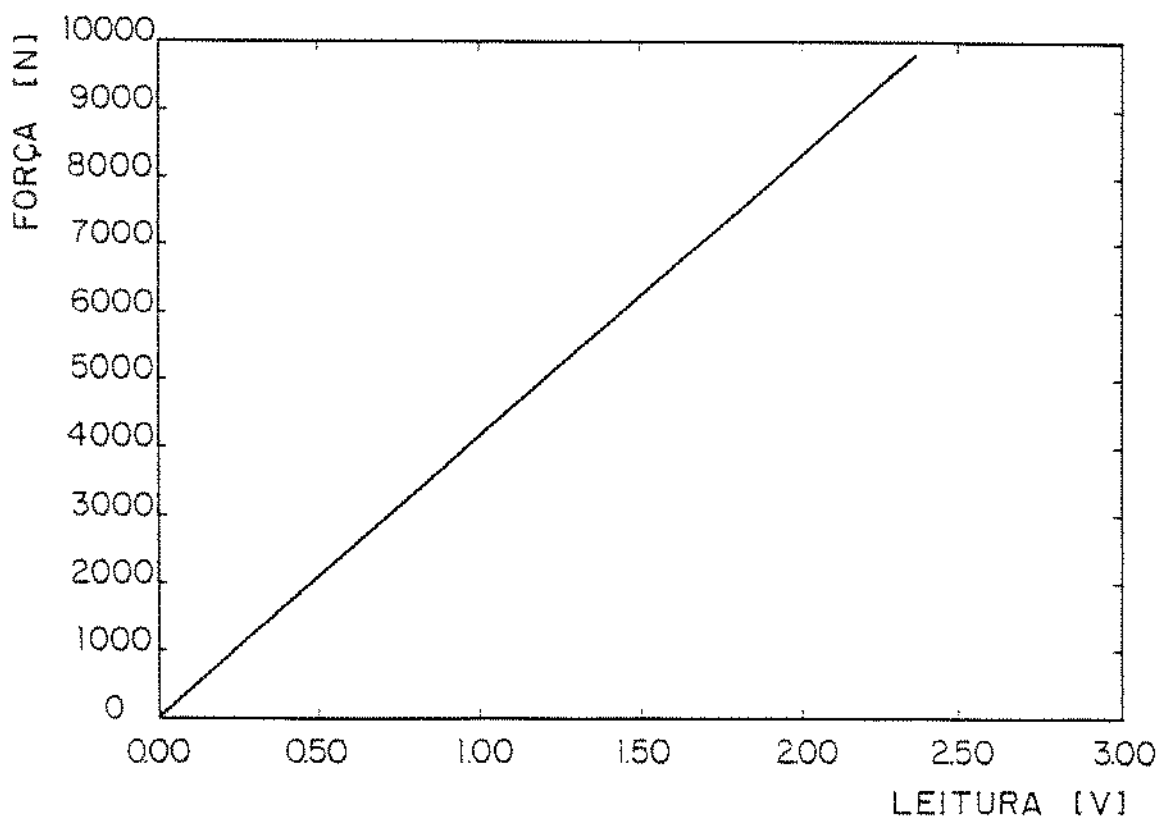


Figura 4.12 - Curva de Aferição do Parafuso tensor

TABELA 4.6 - Valores de cargas e leituras tratadas estatisticamente.

n	F (N)	$\bar{L}$ (Volts)	$\bar{L} \cdot F$	$F^2$	$\bar{L}^2$
1	500	0,110	55,0	250000	0,0121
2	1000	0,193	193,0	1000000	0,0372
3	1500	0,337	505,5	2250000	0,1136
4	2000	0,456	912,0	4000000	0,2079
5	2500	0,576	1440,0	6250000	0,3318
6	3000	0,704	2112,0	9000000	0,4956
7	3500	0,823	2880,5	12250000	0,6773
8	4000	0,945	3780,0	16000000	0,8930
9	4500	1,066	4787,0	20250000	1,1363
10	5000	1,189	5945,0	25000000	1,4137
11	5500	1,317	7243,5	30250000	1,7345
12	6000	1,442	8652,0	36000000	2,0794
13	6500	1,559	10133,5	42250000	2,4305
14	7000	1,689	11823,0	49000000	2,8527
15	7500	1,787	13477,5	56250000	3,2292
16	8000	1,934	15472,0	64000000	3,7403
17	8500	2,053	17450,5	72250000	4,2148
18	9000	2,165	19485,0	81000000	4,6872
19	9500	2,294	21793,0	90250000	5,2624
20	10000	2,405	24050,0	100000000	5,7840
$\Sigma$	105000	25,054	172200,0	717500000	41,3335

#### 4.7 - LEVANTAMENTO DA CURVA TORQUE VERSUS FORÇA AXIAL

Após aferirmos o torquímetro e o parafuso tensor, foi feito o ensaio do dispositivo conforme ilustra a figura 4.13.

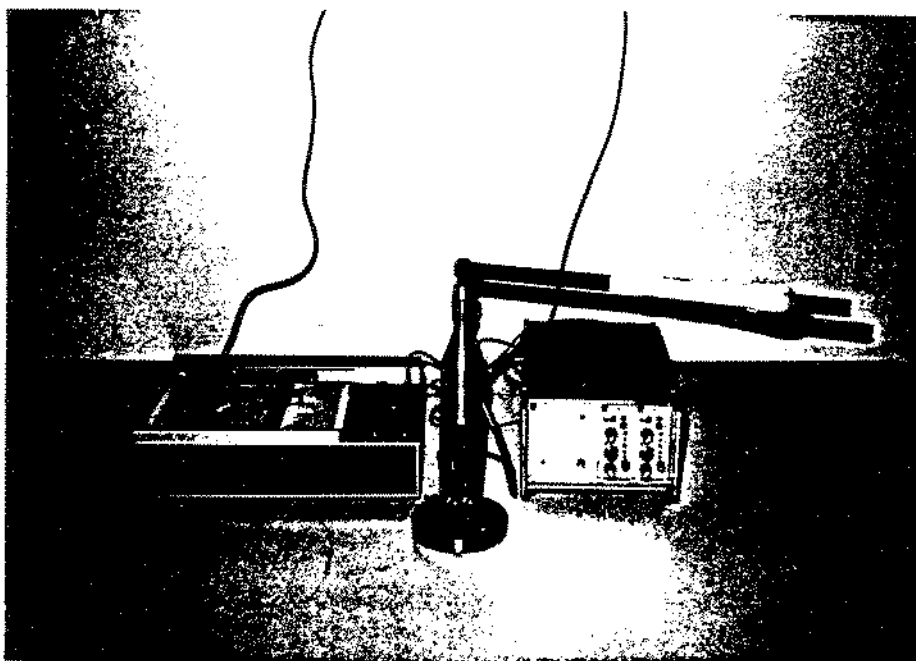


Figura 4.13 - Fotografia da bancada de aferição do dispositivo

Para a realização do ensaio foi necessário a utilização de dois canais da ponte amplificadora, sendo que o torquímetro foi conectado no primeiro, e o conjunto tubo - parafuso tensor, ao segundo canal. O objetivo, após aplicado um torque e, conseqüentemente, ter o seu respectivo sinal em um canal, é obter o sinal da força axial atuante. Porém, foi verificado que era difícil manter fixo o sinal de um torque, quando se queria ler o sinal da força correspondente.

Diante dessa dificuldade, fez-se necessário o uso de um registrador X - Y conectado à ponte amplificadora. Desta forma, foi possível variar o torque X de zero até um determinado valor, e obter-se os respectivos valores da força Y impressos em uma folha.

Em função das escalas de X e Y do registrador foi possível montar a Tabela 4.7 com os respectivos pares ordenados dos valores gravados na folha de registro.

TABELA 4.7

Sinal X [ V ]	0,10	0,30	0,50	0,80	1,00	1,20	1,41	1,60	1,81	2,00
Sinal Y [ V ]	0,05	0,14	0,26	0,43	0,54	0,67	0,76	0,85	0,95	1,06

Com os sinais da força em volts (tabela 4.7), podemos através da figura 4.12 obter seus respectivos valores em N. Após conhecer estes valores, que se encontram na Tabela 4.8, pode-se montar a curva de aferição (Figura 4.14), que melhor se ajusta a estes pontos.

TABELA 4.8

Sinal [ V ]	0,10	0,30	0,50	0,80	1,00	1,20	1,41	1,60	1,81	2,00
Força [ N ]	200	600	1050	1800	2250	2800	3150	550	4000	4450

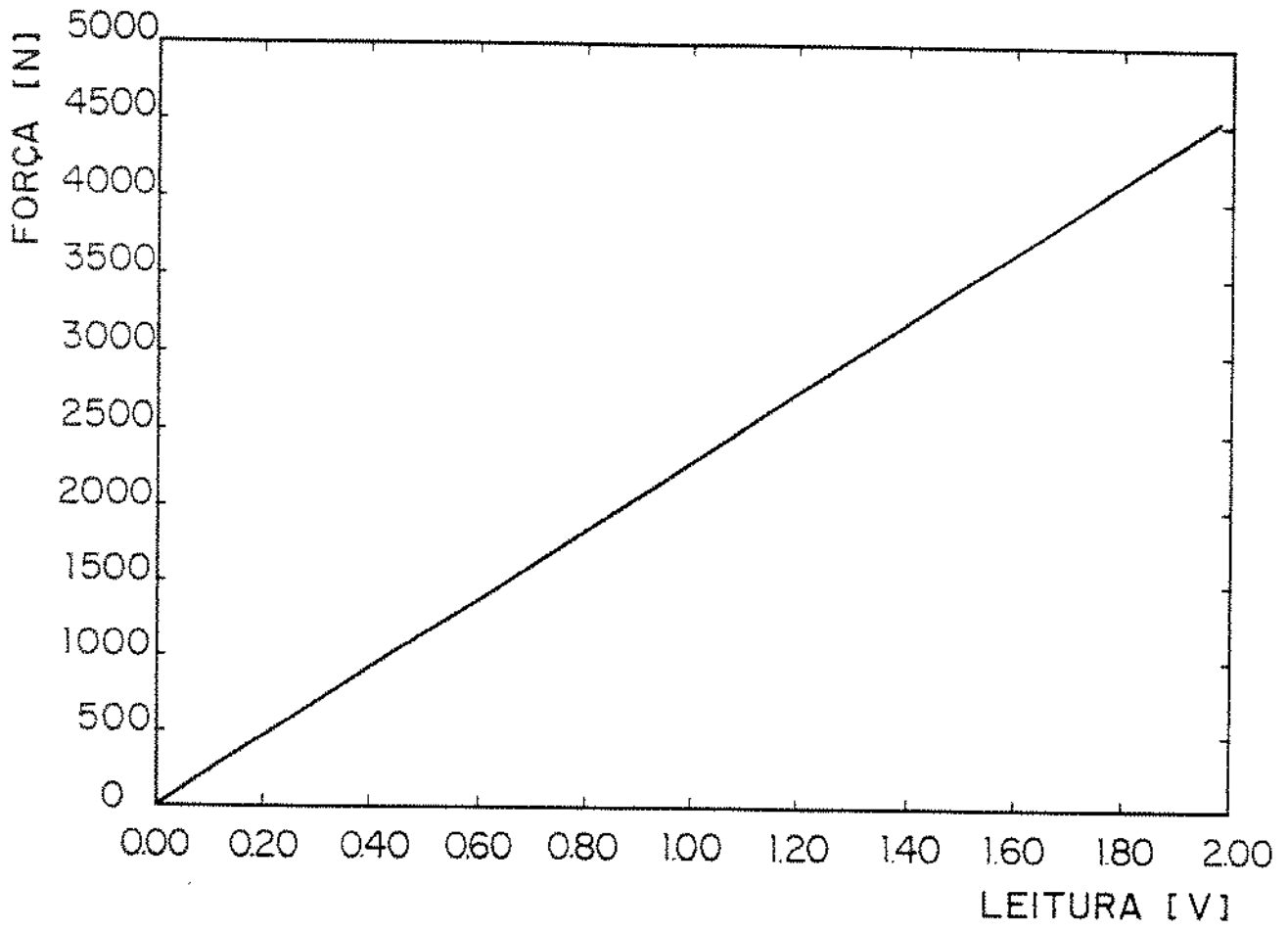


Figura 4.14 - Curva de aferição do dispositivo.

## CAPITULO 5

### CURVAS DE VIDAS SEM PRE-TENSÃO

#### 5.1 - INTRODUÇÃO

Este ensaio foi conduzido a seis diferentes níveis de tensões, como foi mostrado na Tabela 4.2 . Para cada, caso a tensão média é igual a zero, ou seja, é um ensaio sob flexão alternada simétrica.

#### 5.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados destes ensaios, obtidos experimentalmente, são mostrados na Tabela 5.1.

A Tabela 5.2, mostra os valores dos ciclos médios até falha tratados estatisticamente conforme Sinclair [8 ]. Os limites inferiores e superiores foram determinados para 95% de confiança.

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram os resultados desse ensaio, obtido pelo método "escada".

A Figura 5.1, referente ao corpo de prova sem pré-tensão mostra o seu limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'_0$ . Esta curva, que é uma curva de vida média, foi montada em função das Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1 Valores dos ciclos e ciclos médios até falha para o ensaio sem pré-tensão.

Grandezas		Ensaio número (i)							Valor Médio
TENSÃO [MPa]	ciclos	1	2	3	4	5	6	7	
210	$N_L \times 10^3$	27,8	30,0	32,5	33,0	37,0	39,8	40,5	34,37
	Log $N_L$	4,444	4,477	4,512	4,518	4,568	4,600	4,607	4,532
190	$N_L \times 10^3$	43,0	61,2	79,5	81,0	86,0	88,9	93,0	76,00
	Log $N_L$	4,633	4,787	4,900	4,908	4,934	4,949	4,968	4,868
180	$N_L \times 10^3$	35,0	77,0	93,2	98,0	150,0	173,2	187,0	116,17
	Log $N_L$	4,544	4,886	4,969	4,991	5,176	5,238	5,272	5,011
160	$N_L \times 10^3$	134,0	163,0	181,0	205,0	206,0	251,0	431,0	224,42
	Log $N_L$	5,127	5,212	5,258	5,312	5,314	5,400	5,634	5,322
150	$N_L \times 10^3$	199,0	321,5	332,0	356,0	594,0	668,0	743,0	459,00
	Log $N_L$	5,299	5,507	5,521	5,551	5,774	5,825	5,871	5,621
140	$N_L \times 10^3$	498,0	583,0	632,0	723,0	825,0	902,0	13270	784,28
	Log $N_L$	5,697	5,766	5,800	5,860	5,916	5,955	6,123	5,874

Tabela 5.2 Tratamento estatístico dos ciclos médios até falha.

Tensão [MPa]	Número de CPs	LOG N	Lim. de Conf. $\mu$		Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\sum (LOGN - \overline{LOGN})$
210	7	4,532	4,512	4,552	0,057	0,023
190	7	4,868	4,868	4,829	0,111	0,086
180	7	5,011	4,929	5,093	0,234	0,383
160	7	5,322	5,269	5,374	0,150	0,158
150	7	5,621	5,554	5,688	0,192	0,259
140	7	5,874	5,829	5,920	0,130	0,119

Tabela 5.3 Valores dos números de ciclos trabalhados nas tensões utilizadas no método "escada".

CP Número	Tensão [MPa]	Ciclos $N \times 10^6$	CP Número	Tensão [MPa]	Ciclos $N \times 10^6$
1	140	1,33	10	110	10,00
2	130	4,48	11	120	10,00
3	120	10,00	12	110	10,00
4	130	10,00	13	120	10,00
5	140	0,82	14	130	3,27
6	130	6,23	15	120	8,23
7	120	4,53	16	110	10,00
8	110	10,00	17	120	10,00
9	120	4,53	18	140	1,83

Tabela 5.4. Valores de N, A e B para se determinar o limite de resistência à fadiga e desvio-padrão.

Tensão [MPa]	Índice (i)	$n_i$	Produto $i \cdot n_i$	Produto $i^2 \cdot n_i$
130	2	1	2	4
120	1	3	3	3
110	0	4	0	0
$\Sigma$	—	N = 8	A = 5	B = 7

$i = 0$  significa a menor tensão ensaiada onde não ocorreu a ruptura.

$n_i$  = números de corpos de provas não fraturados nas tensões ensaiadas.



Para esse ensaio, o valor do limite de resistência à fadiga, conforme equação 2.6, é dado por:

$$\bar{S}' = 110 + 10 \cdot (5/8 + 0.5) = 121,25 \text{ MPa} ,$$

com um desvio - padrão dado pela equação 2.7, ou seja ,

$$\sigma = 1.620 \cdot 10 \cdot \left( \frac{56 - 25}{64} + 0.029 \right) = 8,3 \text{ MPa} .$$

### 5.3 - OBSERVAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Apesar de terem sido sacrificados somente sete corpos para cada nível de tensão, observou-se que não houve um grande espalhamento dos resultados.

Faz-se necessário observar que o último nível de tensão ensaiado foi de 140 MPa. Portanto, a partir daí, fez-se uso do método da "escada" para determinar o limite de resistência à fadiga com seu respectivo desvio-padrão. É correto que ainda se poderia melhorar esses resultados, fazendo uso de um número maior de corpos de provas.

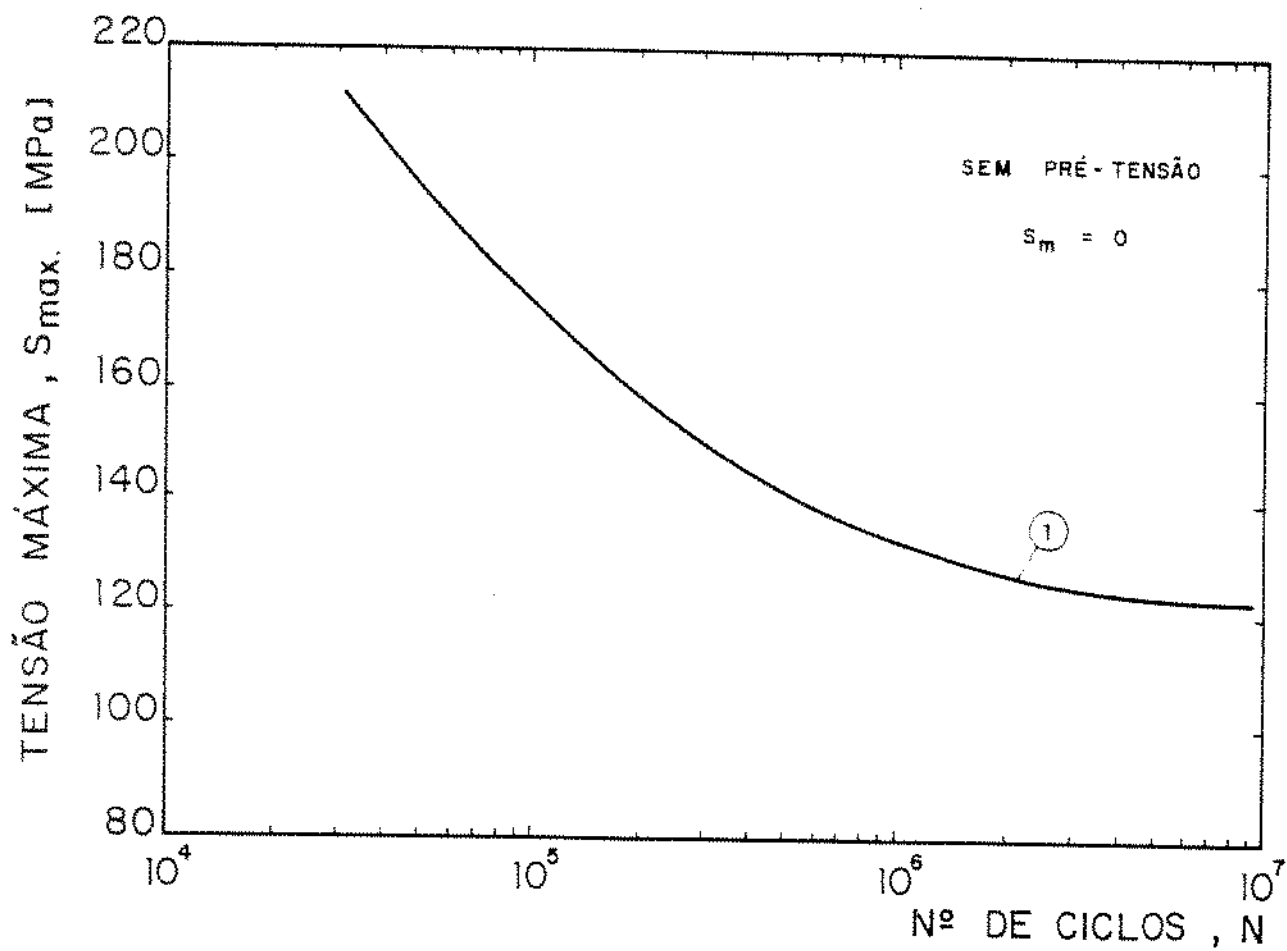


Figura 5.1- Curva S x N (ensaio número 1), para corpos de provas vazados, aço 1010, entalhe de 0,4 mm,  $S_m = 0$ , submetido à flexão alternada com frequência de 3600 ciclos/hora.

## CAPÍTULO 6

### CURVAS DE VIDAS COM PRÉ-TENSÃO

#### 6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo mostra os resultados obtidos dos três ensaios realizados, sob diferentes níveis de pré-tensão. A Tabela 6.1, mostra estes valores com suas respectivas pré-cargas.

Nestes três ensaios a tensão média é diferente de zero, porém deve-se observar que ela permanece constante no decorrer de cada ensaio.

As "curvas de vidas" foram plotadas em função da tensão alternada ( $S_a$ ), sendo este um dos métodos usuais de se representar curvas S-N, para situação em que a tensão média é diferente de zero.

TABELA 6.1. Valores das pré-tensões usadas nos três ensaios.

Ensaio n <sup>o</sup>	Área (mm <sup>2</sup> )	Pré-tensão (MPa)	Pré-carga (N)
1	53,28	- 41,3	2200
2	53,28	- 53,7	2860
3	53,28	- 66,0	3530

6.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PRIMEIRO NÍVEL DE PRÉ-TENSÃO

A Tabela 6.2 mostra os dados obtidos experimentalmente, e a tabela 6.3 mostram estes mesmos dados tratados estatisticamente.

As Tabelas 6.4 e 6.5 mostram os dados obtidos pelo método "escada" e tratamento estatístico, respectivamente. A Figura 6.1 refere-se à curva de vida para este nível de pré-tensão.

TABELA 6.2. Valores dos ciclos e ciclos médios até falha para o ensaio com o primeiro nível de pré-tensão.

Grandezas		Ensaio número (i)							Valor Médio
TENSAO MPa	ciclos	1	2	3	4	5	6	7	
210	$N_i \times 10^3$	45,0	57,5	64,0	66,0	95,5	120,0	134,9	83,90
	Log $N_i$	4,653	4,760	4,806	4,819	4,980	5,082	5,130	4,890
190	$N_i \times 10^3$	90,0	133,0	156,0	184,0	232,0	281,0	296,0	196,0
	Log $N_i$	4,954	5,124	5,193	5,265	5,365	5,449	5,471	5,260
180	$N_i \times 10^3$	215,0	272,0	298,0	313,0	327,0	438,0	481,0	334,86
	Log $N_i$	5,332	5,434	5,474	5,495	5,514	5,641	5,682	5,510
180	$N_i \times 10^3$	467,0	498,0	557,0	572,0	695,0	867,0	13200	710,86
	Log $N_i$	5,669	5,697	5,746	5,757	5,842	5,938	6,120	5,824

TABELA 6.3 - Tratamento estatístico dos ciclos médios até falha.

Tensão MPa	Números de CPs	$\overline{\text{Log N}}$	Lim. de Conf. $\mu$		Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\sum (\text{LogN} - \overline{\text{LogN}})$
210	7	4,890	4,833	4,947	0,164	0,188
190	7	5,260	5,200	5,320	0,172	0,208
180	7	5,510	5,471	5,549	0,111	0,086
160	7	5,824	5,772	5,875	0,147	0,152

TABELA 6.4 - Valores dos números de ciclos trabalhados nas tensões utilizadas no método "escada".

CP Número	Tensão MPa	Ciclos $N \times 10^6$	CP Número	Tensão MPa	Ciclos $N \times 10^6$
1	180	0,63	10	170	0,7
2	150	2,45	11	180	1,1
3	140	10	12	150	8,3
4	150	3,75	13	140	10
5	140	10	14	150	10
6	150	7,2	15	180	0,65
7	140	10	16	150	10
8	150	10	17	180	2,3
9	180	10	18	150	10

TABELA 6.5 - Valores de N, A e B para se determinar o limite de resistência à fadiga e desvio-padrão.

Tensão MPa	Índice (i)	$n_i$	Produto $i \cdot n_i$	Produto $i^2 \cdot n_i$
160	2	1	2	4
150	1	4	4	4
140	0	4	0	0
$\Sigma$	—	N = 9	A = 6	B = 8

$i = 0$  significa a menor tensão ensaiada onde não ocorreu ruptura.  
 $n_i$  = número de corpos de provas não fraturados nas tensões ensaiadas.

O valor do limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'_0$ , para esse caso, fica como segue,

$$\bar{S}'_0 = 140 + 10 \cdot ( 6/9 + 0,5 ) = 151,6 \text{ MPa,}$$

e o desvio-padrão, tem o seguinte valor:

$$\sigma = 16,2 \cdot 10 \cdot \left( \frac{72 - 36}{81} + 0,029 \right) = 7,7 \text{ MPa.}$$

Neste ensaio, o limite de resistência começou a oscilar em torno de 150 MPa. Portanto, a partir deste valor se deu o início do teste da "escada". Comparando-se com os ensaios sem pré-tensão, verifica-se que ocorreu um aumento em todos os níveis de vida, bem como, o limite de resistência à fadiga que passou de 121,2 para 151,6 MPa, correspondente a um aumento de 25,1%  $\pm$  2,2%.

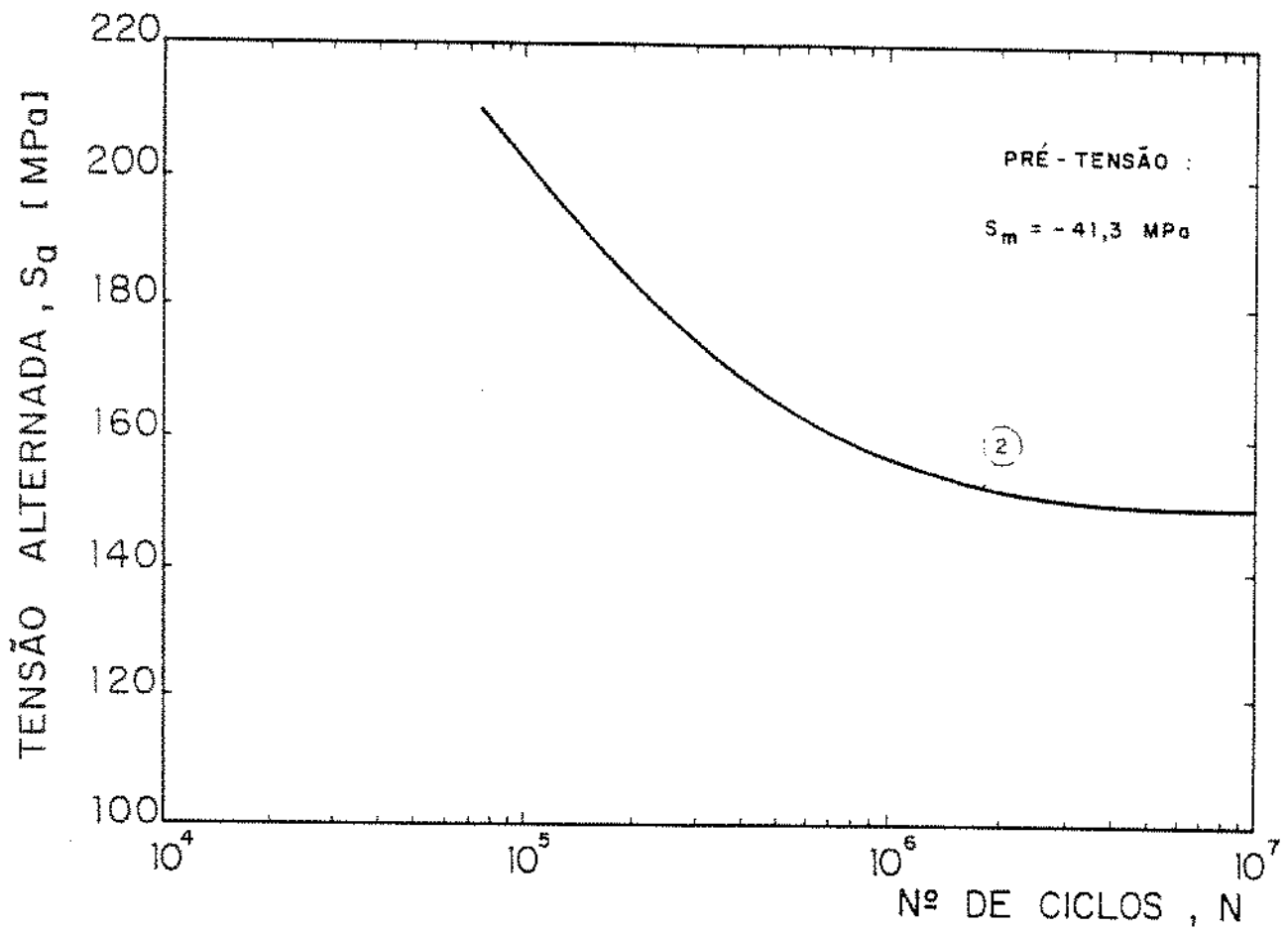


Figura 6.1 - Curva S x N (ensaio número 2) para corpos de provas vazados, aço 1010, entalhe de 0,4mm,  $S_m = -41,3 \text{ MPa}$ , submetidos à flexão alternada com frequência de 3600 ciclos/hora.

### 6.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O SEGUNDO NÍVEL DE PRÉ-TENSÃO

As Tabelas 6.6 e 6.7 mostram os resultados dos ensaios, e as tabelas 6.8 e 6.9 referem-se a esses ensaios tratados estatisticamente. A Figura 6.2 mostra a curva de vida eo limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'_0$ . Ambos foram obtidos em função das tabelas 6.6 e 6.7.

**TABELA 6.6** Valores dos ciclos até falha para o segundo nível de pré-tensão.

Grandezas		Ensaio número (i)							Valor
TENSÃO [MPa]	ciclos	1	2	3	4	5	6	7	Médio
210	$N_i \times 10^3$	83,0	88,0	96,0	98,0	125,0	136,0	159,0	112,15
	$\text{Log } N_i$	4,919	4,944	4,982	4,991	5,097	5,133	5,201	5,038
190	$N_i \times 10^3$	115,0	133,0	171,0	207,0	235,0	324,0	423,0	229,71
	$\text{Log } N_i$	5,061	5,124	5,234	5,316	5,371	5,510	5,626	5,320
180	$N_i \times 10^3$	246,0	285,0	326,0	374,0	437,0	481,0	526,0	382,14
	$\text{Log } N_i$	5,391	5,455	5,513	5,573	5,640	5,682	5,721	5,568

**TABELA 6.7** Tratamento estatístico dos ciclos médios até falha.

Tensão MPa	Números de CFS	$\overline{\text{Log } N}$	Lim. de Conf. $\mu$		Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\sum (\text{Log } N - \overline{\text{Log } N})$
210	7	5,038	5,004	5,072	0,098	0,067
190	7	5,320	5,254	5,385	0,187	0,245
180	7	5,568	5,528	5,607	0,113	0,089



**TABELA 6.8** - Valores dos números de ciclos trabalhados nas tensões utilizadas no método "escada".

CP Número	Tensão [MPa]	Ciclos $N \times 10^6$	CP Número	Tensão [MPa]	Ciclos $N \times 10^6$
1	170	1,23	10	160	10
2	160	3,2	11	150	10
3	150	10	12	160	10
4	180	4,5	13	170	1,5
5	150	10	14	160	10
6	160	1,8	15	170	10
7	150	10	16	180	0,7
8	160	10	17	170	2,4
9	170	0,8	18	160	10

**TABELA 6.9** - Valores de N, A e B para se determinar o limite de resistência à fadiga e desvio-padrão.

Tensão [MPa]	Índice (i)	$n_i$	Produto $i \cdot n_i$	Produto $i^2 \cdot n_i$
170	2	1	2	4
160	1	5	5	5
150	0	4	0	0
$\Sigma$	—	N = 10	A = 7	B = 9

i = 0 significa a menor tensão ensaiada onde não ocorreu a ruptura.

$n_i$  = números de corpos de provas não fraturados nas tensões ensaiadas.

Assim sendo, o limite de fadiga  $\bar{S}'$  fica da seguinte forma :

$$\bar{S}' = 150 + 10 \cdot ( 7/10 + 0,5 ) = 162 \text{ MPa,}$$

e o valor do desvio-padrão fica como segue,

$$\sigma = 1,62 \cdot 10 \cdot \left( \frac{90 - 49}{100} + 0,029 \right) = 7,1 \text{ MPa.}$$

Neste ensaio o limite de fadiga começou a oscilar em torno de 150 MPa. A partir deste valor se deu o início do teste da "escada". Comparando-se com o ensaio anterior, verificou-se um aumento de vida em todos os níveis de vida, e o limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'$  passou de 151,6 para 162 MPa, correspondente a um aumento de  $6,9\% \pm 0,8\%$ . Comparando-se com o ensaio dos corpos de provas sem pré-tensão temos um aumento acumulado no limite de resistência à fadiga de  $33,7\% \pm 3,4\%$ .

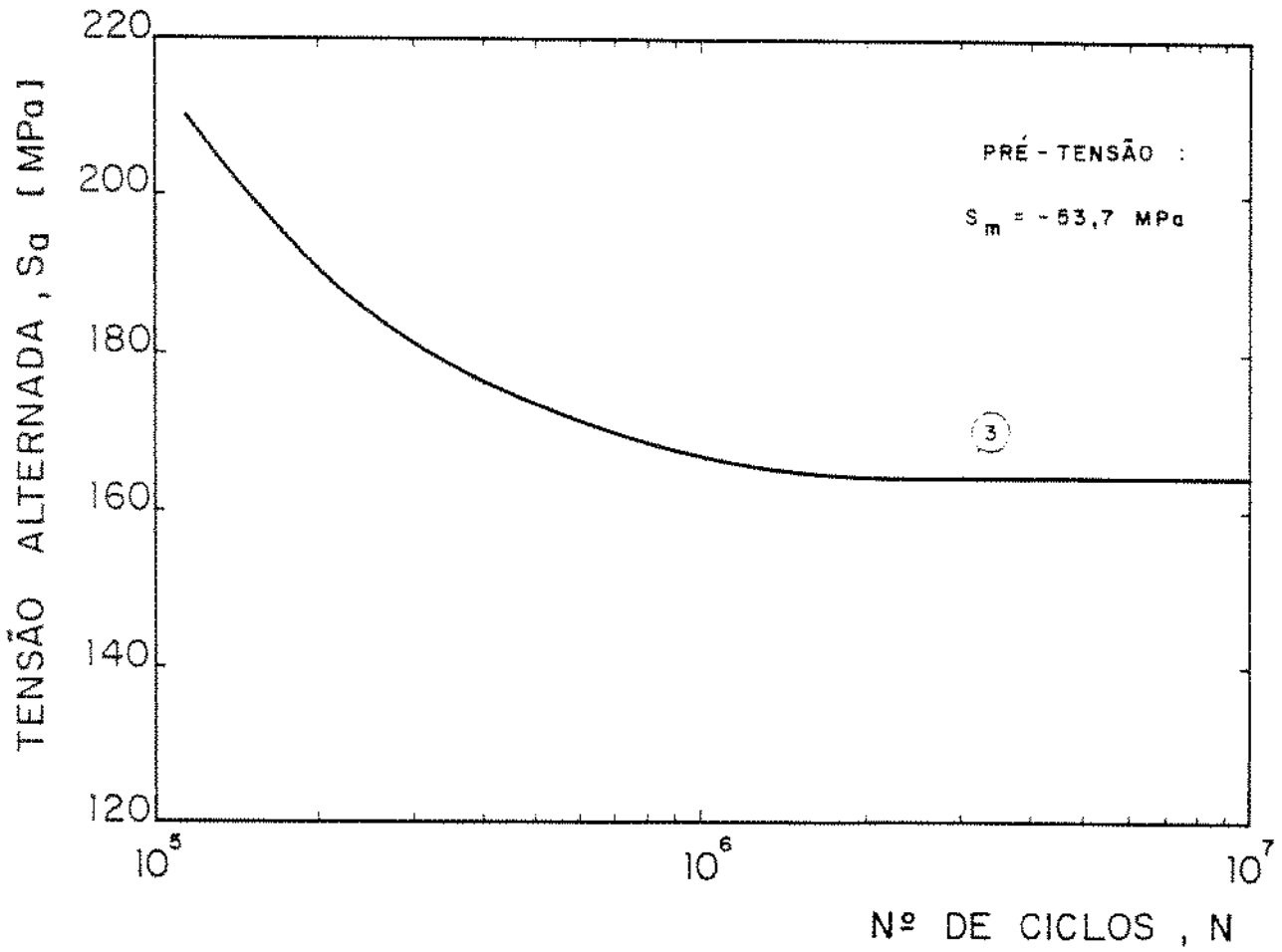


Figura 6.2 - Curva S x N (ensaio número 3) para corpos de prova vazados, aço 1010, entalhes de 0,4mm,  $S_m = - 53,7 \text{ MPa}$ , submetidos à flexão alternada com frequência de 3600 ciclos/hora.

#### 6.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O TERCEIRO NÍVEL DE PRÉ-TENSÃO

Os resultados desse último ensaio, realizado sob uma pré-tensão de 66 MPa, estão apresentados nas Tabelas 6.10 e 6.11. As Tabelas 6.12 e 6.13 referem-se a estes dados tratados estatisticamente. A Figura 5.3 representa a curva de vida deste ensaio, bem como o limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'_f$ .

TABELA 6.10 Valores dos ciclos até falha para o ensaio com o terceiro nível de pré-tensão.

Grandezas		Ensaio número (i)							Valor Médio
TENSÃO [MPa]	ciclos	1	2	3	4	5	6	7	
210	$N_i \times 10^3$	72,08	94,00	101,0	113,0	132,5	221,0	263,0	142,36
	$\text{Log } N_i$	4,857	4,973	5,004	5,053	5,122	5,344	5,420	5,110
190	$N_i \times 10^3$	161,0	166,0	229,0	257,0	260,0	320,0	357,0	250,00
	$\text{Log } N_i$	5,207	5,220	5,360	5,410	5,415	5,505	5,553	5,381

TABELA 6.11 Tratamento estatístico dos ciclos médios até falha.

Tensão [MPa]	Números de CPs	$\overline{\text{Log } N}$	Lim. de Conf. $\mu$		Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$\sum (\text{Log } N - \overline{\text{Log } N})$
210	7	5,110	5,044	5,176	0,188	0,248
190	7	5,381	5,338	5,424	0,122	0,104

TABELA 6.12 Valores dos números de ciclos trabalhados nas tensões utilizadas no método "escada".

CP Número	Tensão [MPa]	Ciclos $N \times 10^6$	CP Número	Tensão [MPa]	Ciclos $N \times 10^6$
1	180	1,3	10	170	10
2	170	10	11	180	2,20
3	180	0,75	12	170	10
4	170	10	13	180	1,5
5	180	10	14	170	7,5
6	190	0,32	15	160	10
7	180	10	16	170	10
8	190	0,47	17	180	1,9
9	180	0,82	18	170	8,6

TABELA 6.13 Valores de N, A e B para se determinar o limite de resistência à fadiga e desvio-padrão.

TENSÃO [MPa]	Índice (i)	$n_i$	Produto $i \cdot n_i$	Produto $i^2 \cdot n_i$
180	2	2	4	8
170	1	5	5	5
160	0	1	0	0
$\Sigma$	—	N = 8	A = 9	B = 13

i = 0 significa a menor tensão ensalada onde não ocorreu a ruptura.

$n_i$  = número de corpos de provas não fraturados nas tensões ensaladas.

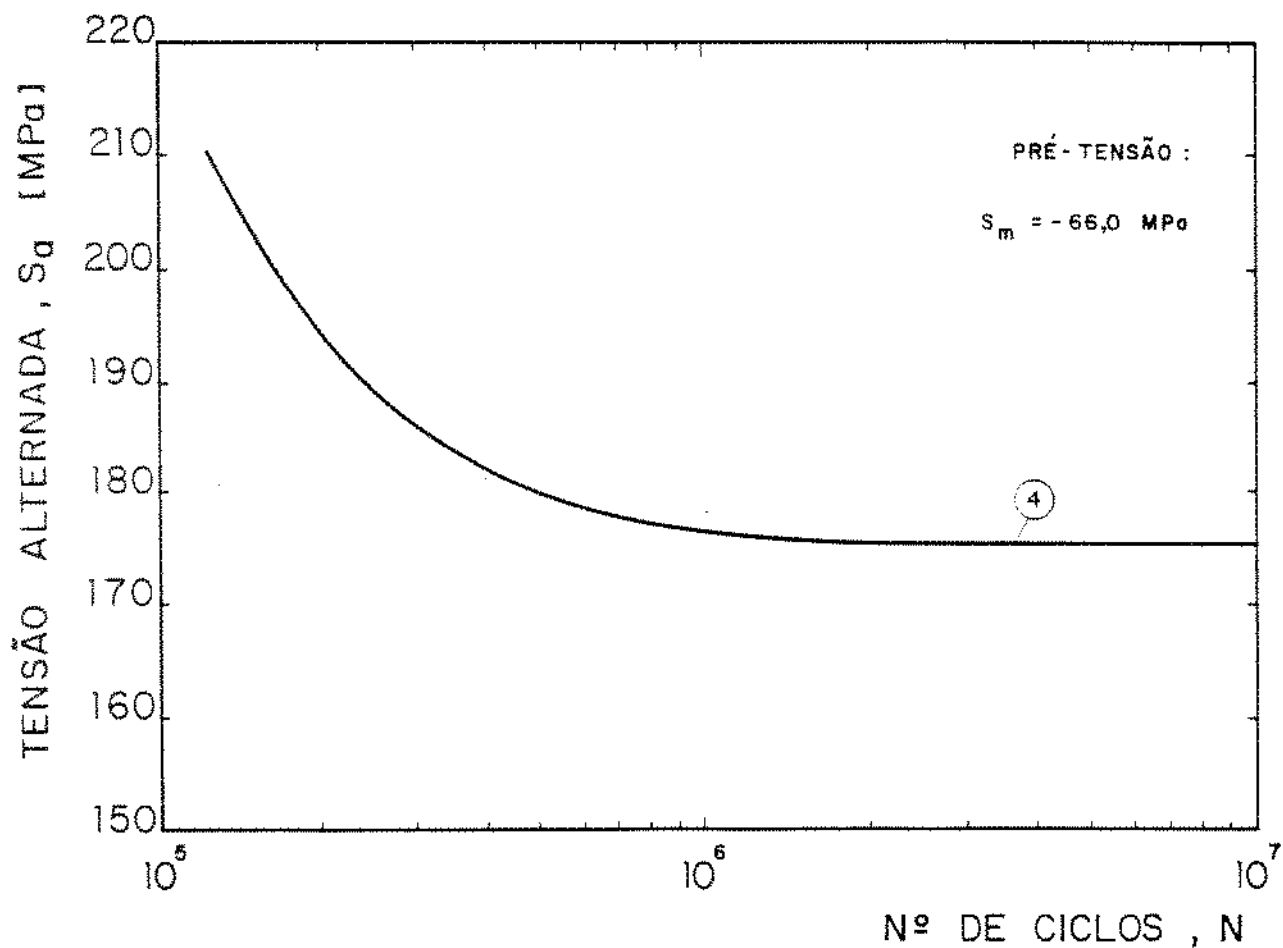


Figura 6.3 - Curva S x N (ensaio número 4) para corpos de prova vazados, aço 1010, entalhes de 0,4mm  $S_m = -66,0 \text{ MPa}$ , submetido à flexão alternada com frequência de 3600 ciclos/hora.

O limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'_0$  fica com segue:

$$\bar{S}'_0 = 16 + . 10.( 9/8 + 0,5 ) = 176,2 \text{ MPa,}$$

e o desvio-padrão tem o seguinte valor:

$$\sigma = 1,62 . 10. \left( \frac{104 - 81}{64} + 0,029 \right) = 6,3 \text{ MPa.}$$

Nesse ensaio o limite de resistência à fadiga  $\bar{S}'_0$  começou a oscilar em torno de 180 MPa, sendo confirmado o valor de 176,2 MPa após a aplicação do teste da "escada". Verifica-se um aumento nos níveis de vida e o limite de resistência à fadiga passou de 162 para 176,2 MPa, correspondente a um aumento de  $8,8\% \pm 0,9\%$ . Comparando-se com limite de resistência à fadiga do ensaio sem pré-tensão, temos um aumento acumulado de  $45,4\% \pm 3,9\%$ .

#### 6.5 - COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES NÍVEIS DE RESISTÊNCIA

A Figura 5.4 mostra as curvas médias referentes aos ensaios com e sem pré-tensão. Verifica-se que ocorre um significativo aumento na vida média, bem como no limite de resistência à fadiga quando é induzida uma pré-tensão. Quanto maior este valor, maior será o aumento de vida média. Na figura 5.4 a curva 1 refere-se ao ensaio sem pré-tensão, as curvas 2,3 e 4 referem-se respectivamente aos ensaios com o primeiro, segundo e terceiro níveis de pré-tensão.

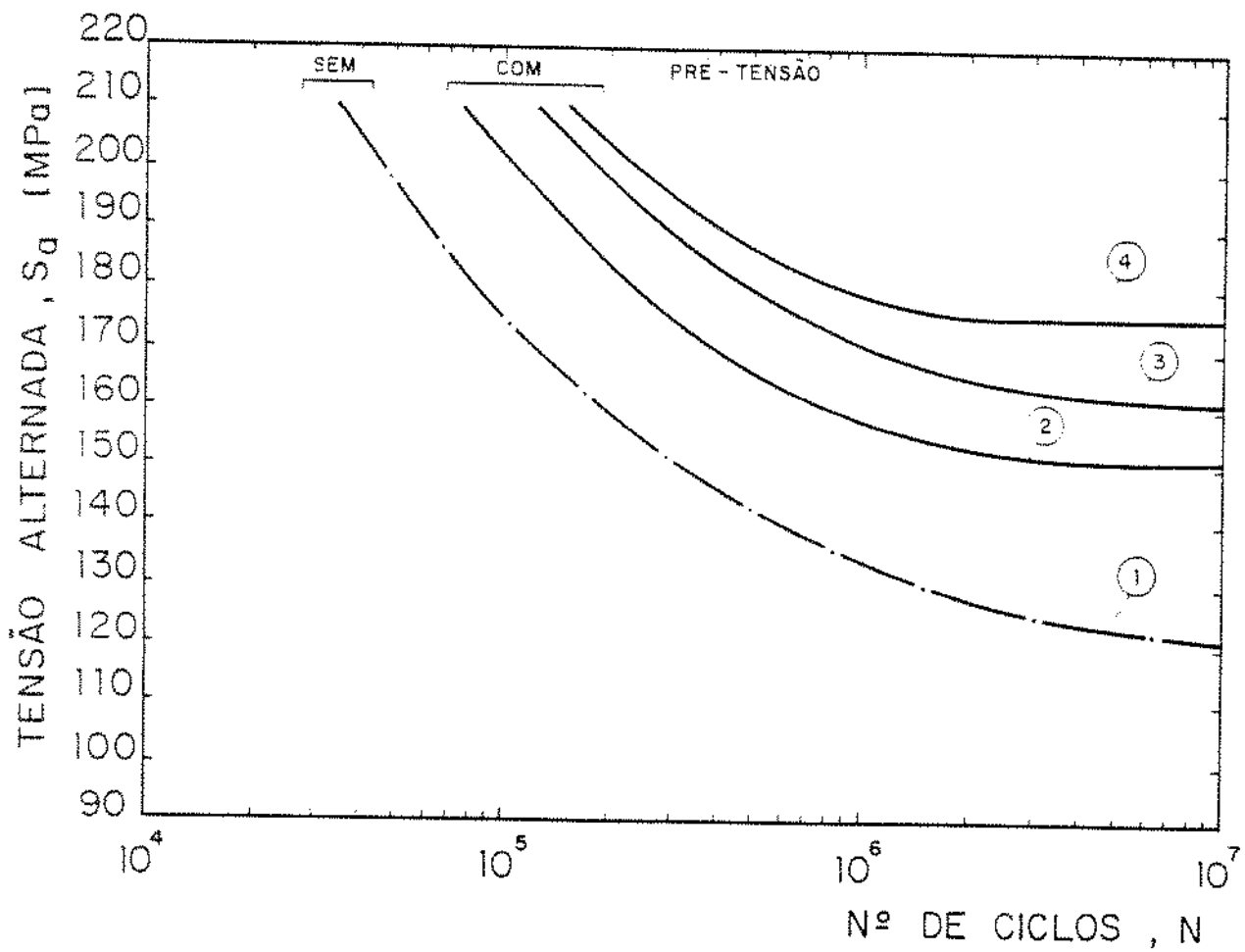


Figura 6.4 - Comparação das curvas obtidas com diversos valores da pré-tensão, para corpos de provas vazados, aço 1010, entalhes de 0,4mm, submetido a flexão alternada com frequência de 3600 ciclos/hora..



## CAPÍTULO 7

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 7.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo final de determinar as curvas de Confiabilidade e os valores de vida  $N_{10}$  para cada nível de tensão e para cada condição de ensaio, fêz-se necessário a determinação das constantes da equação de Weibull. As constantes, correspondente ao fator de forma  $b$ , fator de escala  $\theta$  e o parâmetro de posição  $\hat{a}$ , foram determinadas graficamente, através das curvas retificadas que se encontram representadas nos GPW.

#### 7.2 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DA EQUAÇÃO DE WEIBULL

Para todos os ensaios realizados, as constantes de Weibull foram determinadas conforme recomendações da NBR 9321/86 [21], cujo procedimento está descrito no capítulo 3, item 3.7.

#### 7.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS SEM PRÉ-TENSÃO

A Tabela 7.1 resume os resultados obtidos para os ensaios dos corpos de prova sem pré-tensão. Nela encontram-se o número de ciclos até falha para os diversos corpos ensaiados, e os

Tabela 7.1 - Determinação dos Valores das Constantes da Equação de Weibull para o ensaio sem pretensão

Nível de Tensão S <sub>max</sub>	Número Ordem i	Grau Médio %	Ciclos até falha N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Menor Valor da falha N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Maior Valor da falha N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Valor Médio da falha N <sub>m</sub> x 10 <sup>2</sup>	Parâmetro de posição β x 10 <sup>3</sup>	Falha corrigida N <sub>c</sub> x 10 <sup>4</sup>	Fator de Forma b	Fator de Escala θ x 10 <sup>5</sup>
1	1	9,428	27,80					11,00		
	2	22,429	30,00					14,00		
	3	36,412	32,50					16,50		
	4	50,000	33,00		40,50	33,00	16,00	17,00	4,00	21,00
	5	63,588	37,00					21,00		
	6	77,151	39,80		27,80			23,80		
	7	90,572	40,50					24,50		
2	1	9,428	43,00					9,14		
	2	22,429	61,20					27,24		
	3	36,412	79,50					45,04		
	4	50,000	81,00		93,00	75,00	33,86	47,14	9,67	52,00
	5	63,588	86,00		43,00			52,14		
	6	77,151	88,90					55,04		
	7	90,572	93,00					59,14		
3	1	9,428	33,00					23,46		
	2	22,429	77,00					65,46		
	3	36,412	93,20					81,66		
	4	50,000	98,00		187,00	99,00	11,54	85,46	1,43	122,00
	5	63,588	150,00		35,00			138,46		
	6	77,151	173,20					161,66		
	7	90,572	187,00					175,46		
4	1	9,428	134,00					26,40		
	2	22,429	163,00					55,40		
	3	36,412	181,00					73,40		
	4	50,000	205,00		431,00	200,00	107,00	97,40	1,50	120,00
	5	63,588	206,00		134,00			98,40		
	6	77,151	251,00					143,40		
	7	90,572	431,00					324,40		
5	1	9,428	199,00					144,76		
	2	22,429	321,50					267,26		
	3	36,412	332,00					277,76		
	4	50,000	356,00		743,00	370,00	54,24	301,76	2,36	460,00
	5	63,588	594,00		199,00			539,76		
	6	77,151	688,00					613,76		
	7	90,572	743,00					668,76		
6	1	9,428	498,00					71,20		
	2	22,429	583,00					156,20		
	3	36,412	632,00					205,20		
	4	50,000	723,00		1327,00	680,00	426,00	296,20	1,13	400,00
	5	63,588	825,00		498,00			398,20		
	6	77,151	902,00					475,20		
	7	90,572	1327,00					900,20		

Notas: \*1 - conforme ABNT - NBR 6742

\*2 - valores medidos em ensaio

\*3 - Valor médio conforme ABNT - NBR 6742

\*4 - conforme ABNT - NBR 9321

valores dos ciclos corrigidos que originam as curvas retificadas. Os valores das constantes de Weibull ( $b$ ,  $\theta$  e  $\hat{\alpha}$ ) também estão relacionados para os seis níveis de tensão aplicados.

Os GPW relativos aos ensaios números 01 a 06, sem pré-tensão, mostram as curvas originais e retificadas, considerando o número de ciclos até falha,  $N$  x a percentagem acumulada de falhas,  $F$ . Essas curvas foram utilizadas para a determinação das constantes de Weibull.

A Figura 7.1 resume as curvas de Confiabilidades para os seis níveis de tensão aplicadas, obtidas quando se empregam os valores de  $b$ ,  $\theta$  e  $\hat{\alpha}$  na equação de Weibull. Os resultados numéricos são apresentados em anexo.

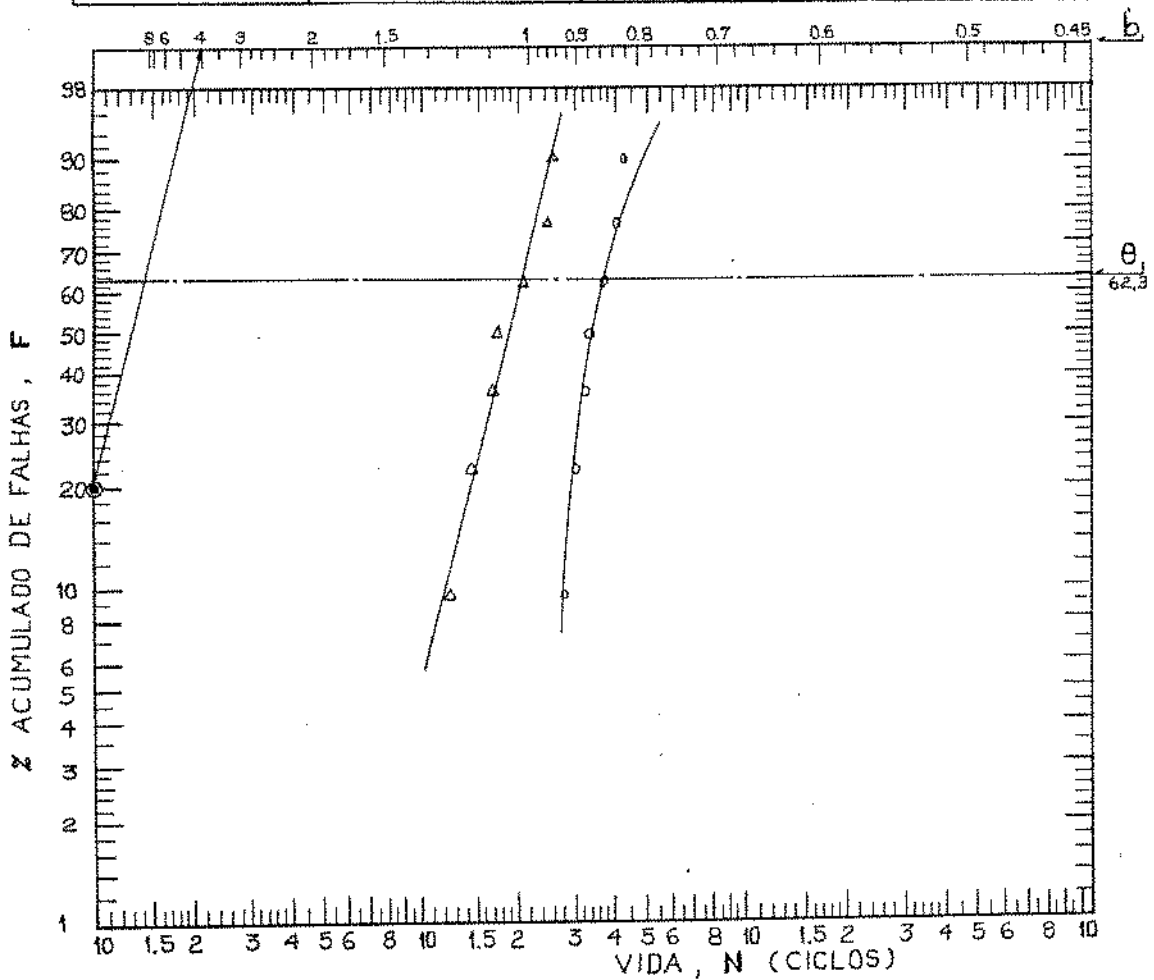
#### 7.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O PRIMEIRO NÍVEL DE PRÉ-TENSÃO

A Tabela 7.2, semelhante a Tabela 7.1, resume os resultados obtidos com o primeiro nível de pré-tensão, ou seja, -41,3 MPa. As constantes de Weibull também estão relacionadas para os diversos níveis de tensão com esse nível de pré-tensão.

Os ensaios números 01 a 04, com pré-tensão, mostram as curvas originais e retificadas, considerando o número de ciclos até falha,  $N$  x percentagem acumulada de falhas,  $F$ . Essas curvas foram utilizadas para a determinação das constantes de Weibull.

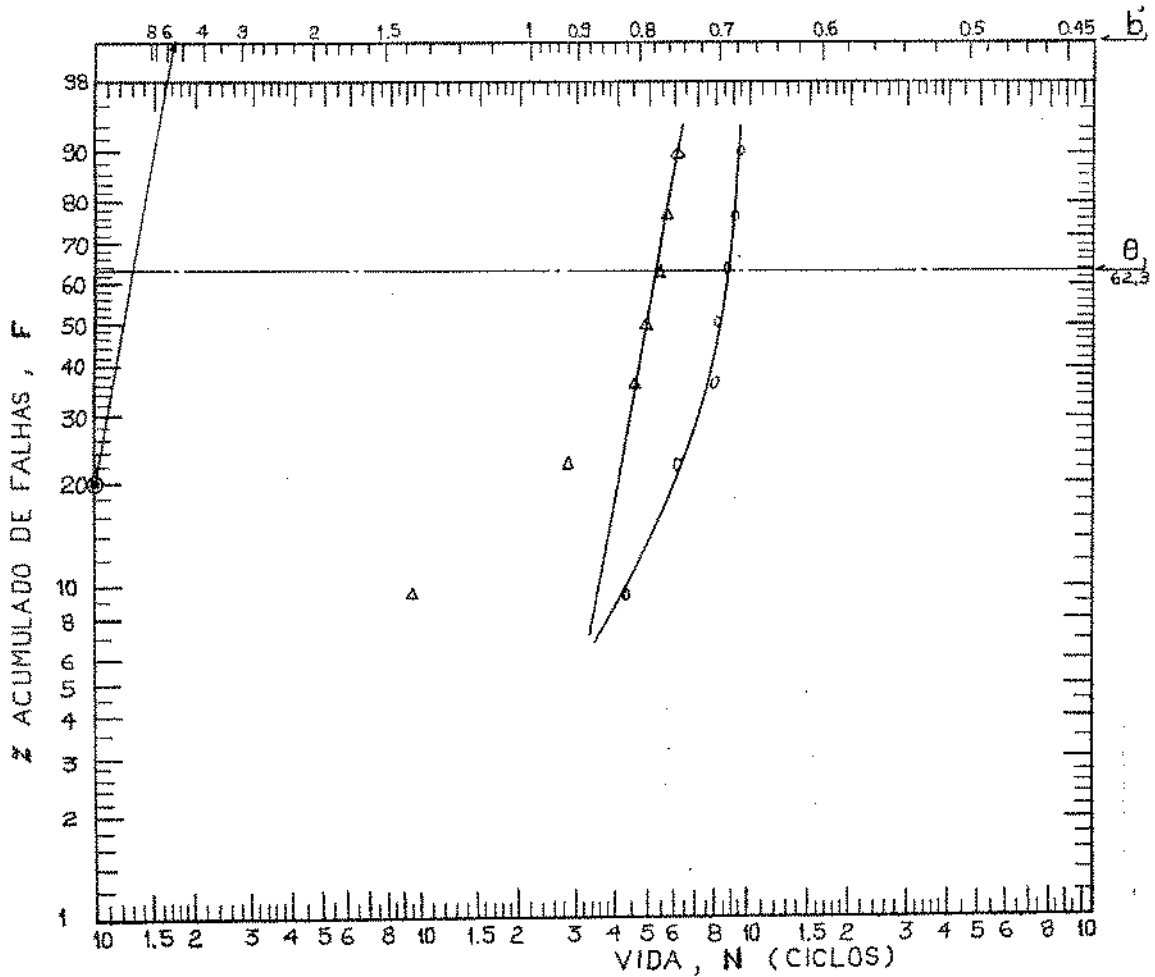
A Figura 7.7 a 7.10 resume as curvas de Confiabilidade para os diversos níveis de tensão aplicadas, obtidas quando se empregam os valores de  $b$ ,  $\theta$  e  $\hat{\alpha}$  na equação de Weibull. Os resultados numéricos estão em anexo.

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 01	PEÇA Corpo de prova sem pré-tensão	FOLHA Nº 01/6	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa - $S_m=0$ - $S_{max}=210$ MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARÂMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 16.000$	FATOR DE FORMA $b = 4,00$	FATOR DE ESCALA $\theta = 21.000$



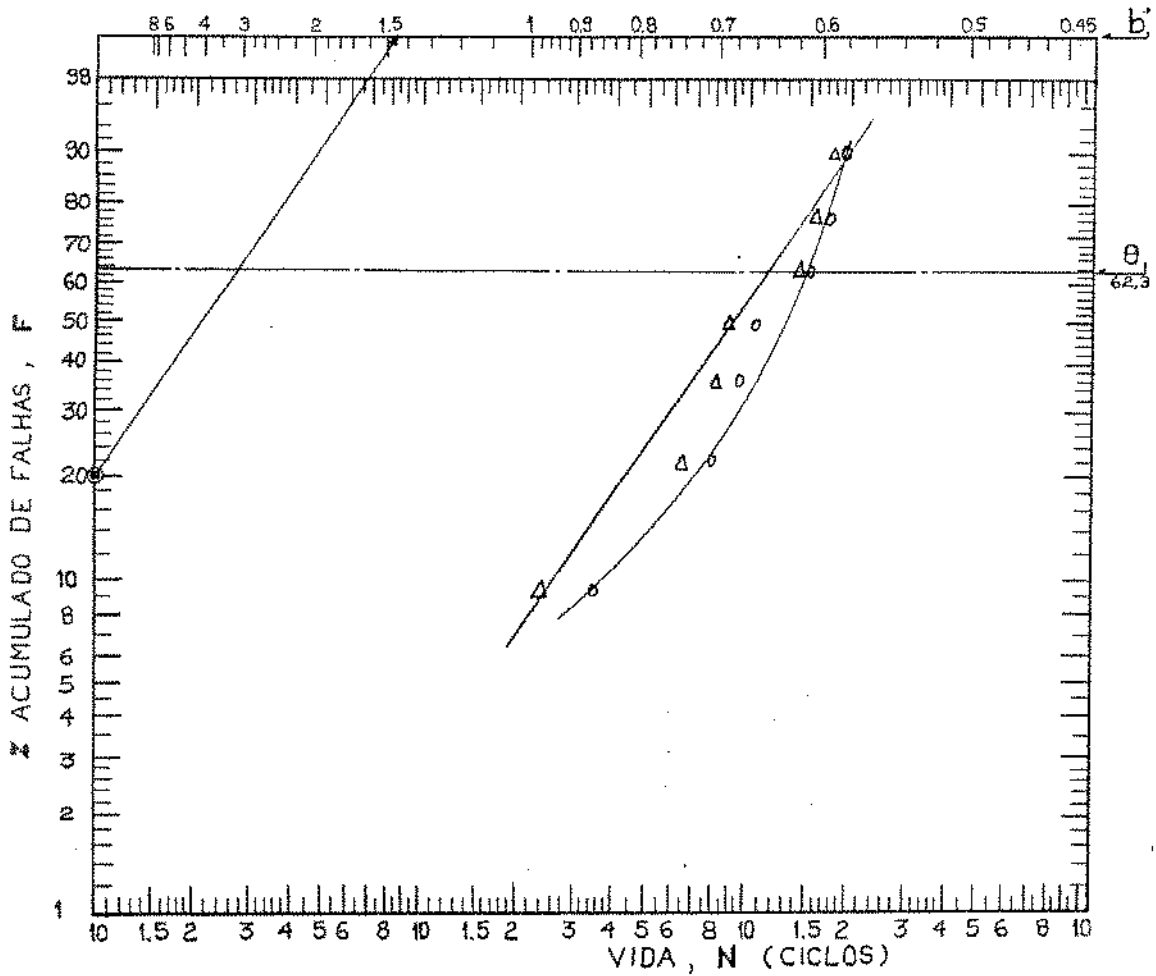
Ensaio número 1 (sem pré-tensão)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 02	PEÇA Corpo de prova sem pré-tensão	FOLHA Nº 02/6	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa - $S_m=0$ - $S_{max}=190$ MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $a = 33.860$	FATOR DE FORMA $b = 5,67$	FATOR DE ESCALA $\theta = 52.000$



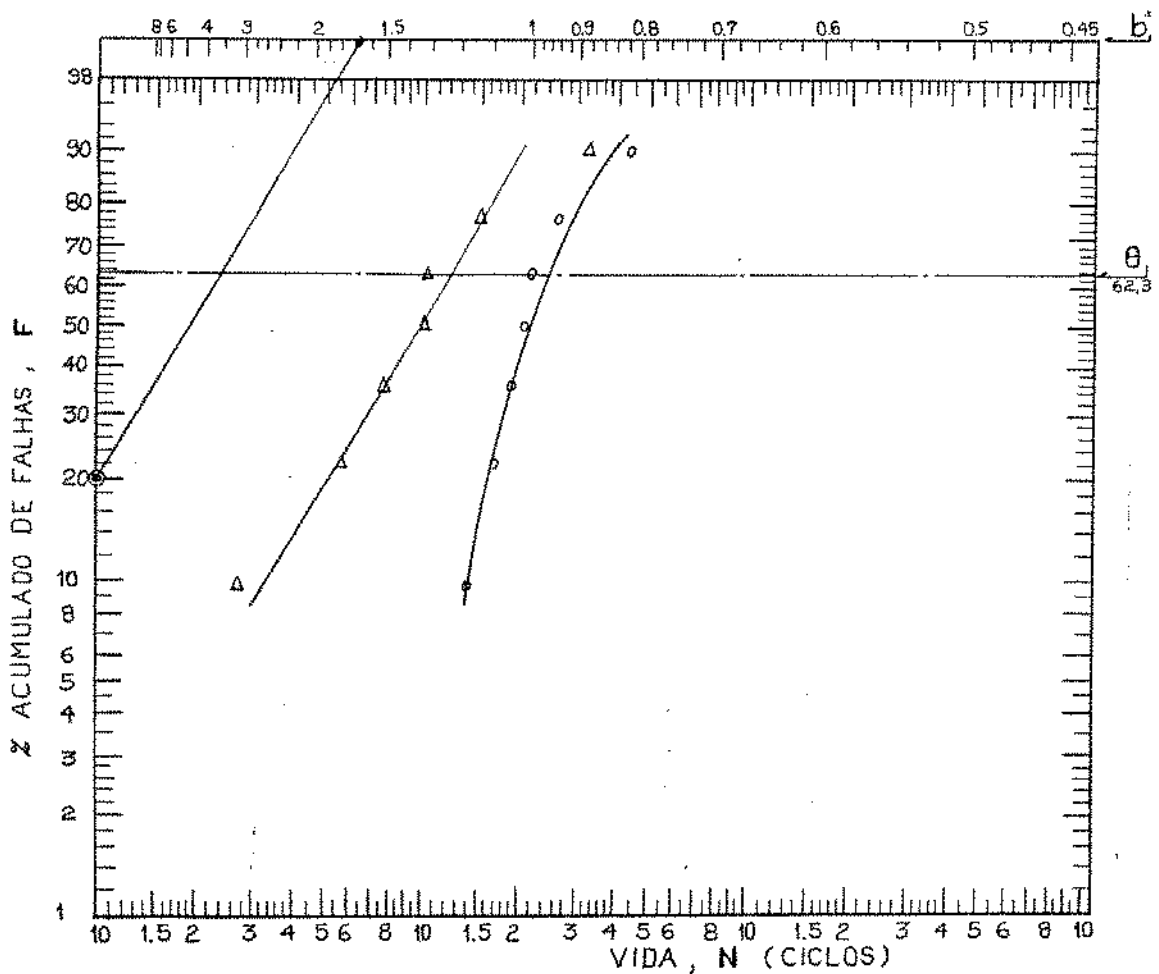
Ensaio número 2 (sem pré-tensão)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 03	PEÇA Corpo de prova sem pré-tensão	FOLHA Nº 03/6	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa - $S_m=0$ - $S_{max}$ 180 MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 11.540$	FATOR DE FORMA $b = 1,43$	FATOR DE ESCALA $\theta = 122.000$



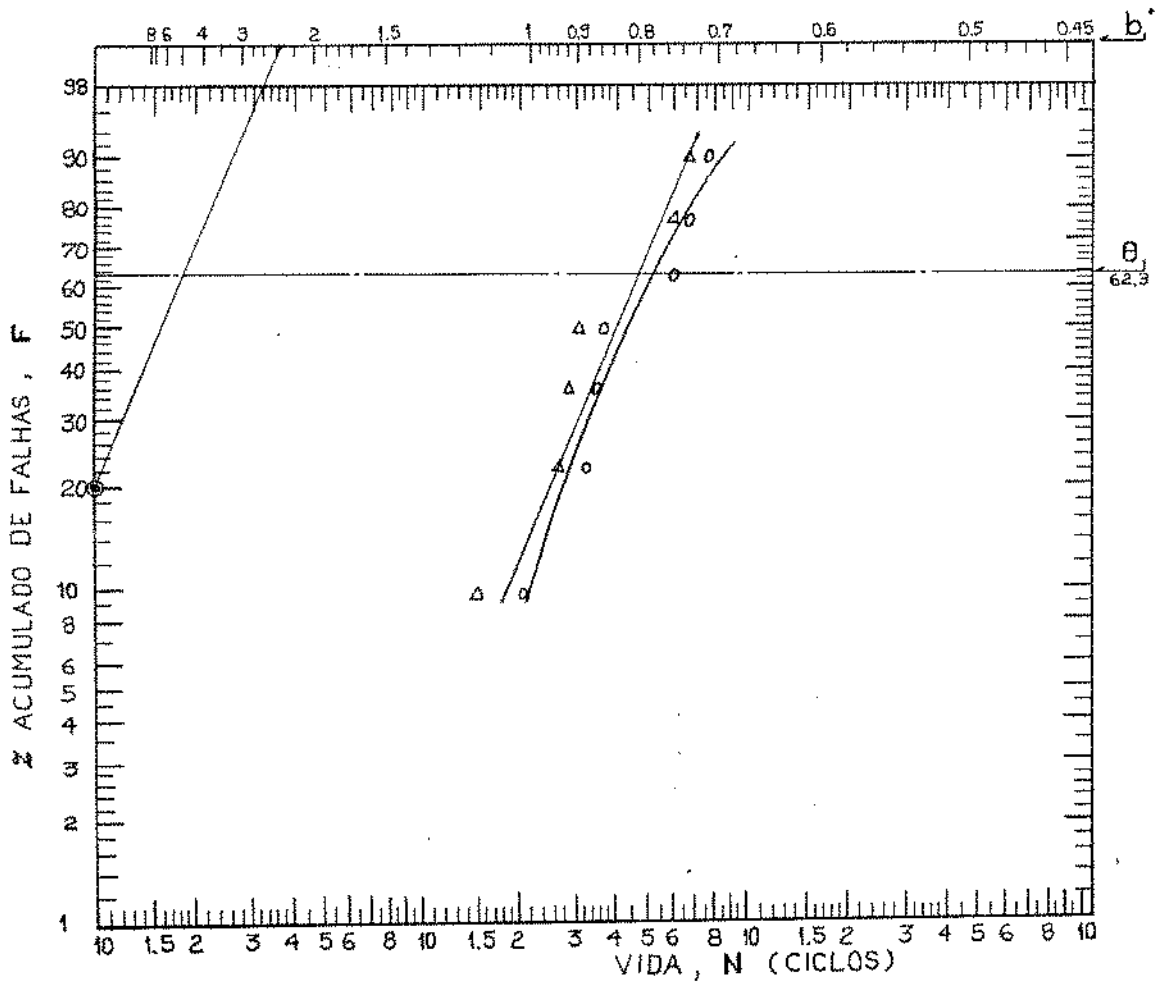
Ensaio número 3 (sem pré-tensão)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 04	PEÇA Corpo de prova sem pré-tensão	FOLHA Nº 04/6	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa - $S_m=0$ - $S_{max}=160$ MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $a = 107.600$	FATOR DE FORMA $b = 1,66$	FATOR DE ESCALA $\theta = 120.000$



Ensaio número 4 (sem pré-tensão)

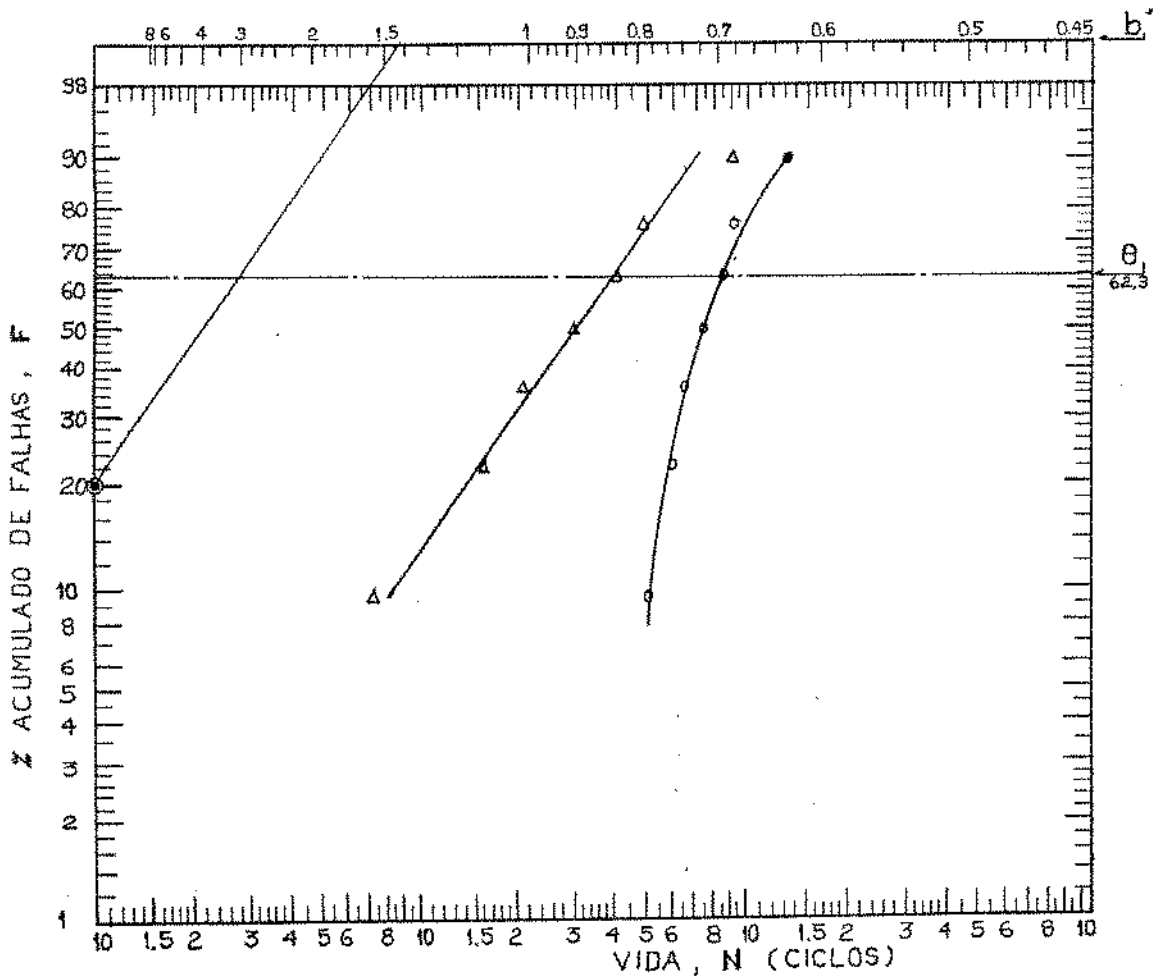
GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 05	PEÇA Corpo de prova sem pré-tensão	FOLHA Nº 05/6	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa - $S_m=0$ - $S_{max}=150$ MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 54.240$	FATOR DE FORMA $b = 2,36$	FATOR DE ESCALA $\theta = 460.000$



Ensaio número 5 (sem pré-tensão)



GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 06	PEÇA Corpo de prova sem pré-tensão	FOLHA Nº 06/6	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa - $S_m=0$ - $S_{max}=140$ MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 426.000$	FATOR DE FORMA $b = 1,43$	FATOR DE ESCALA $\theta = 400.000$



Ensaio número 6 (sem pré-tensão)

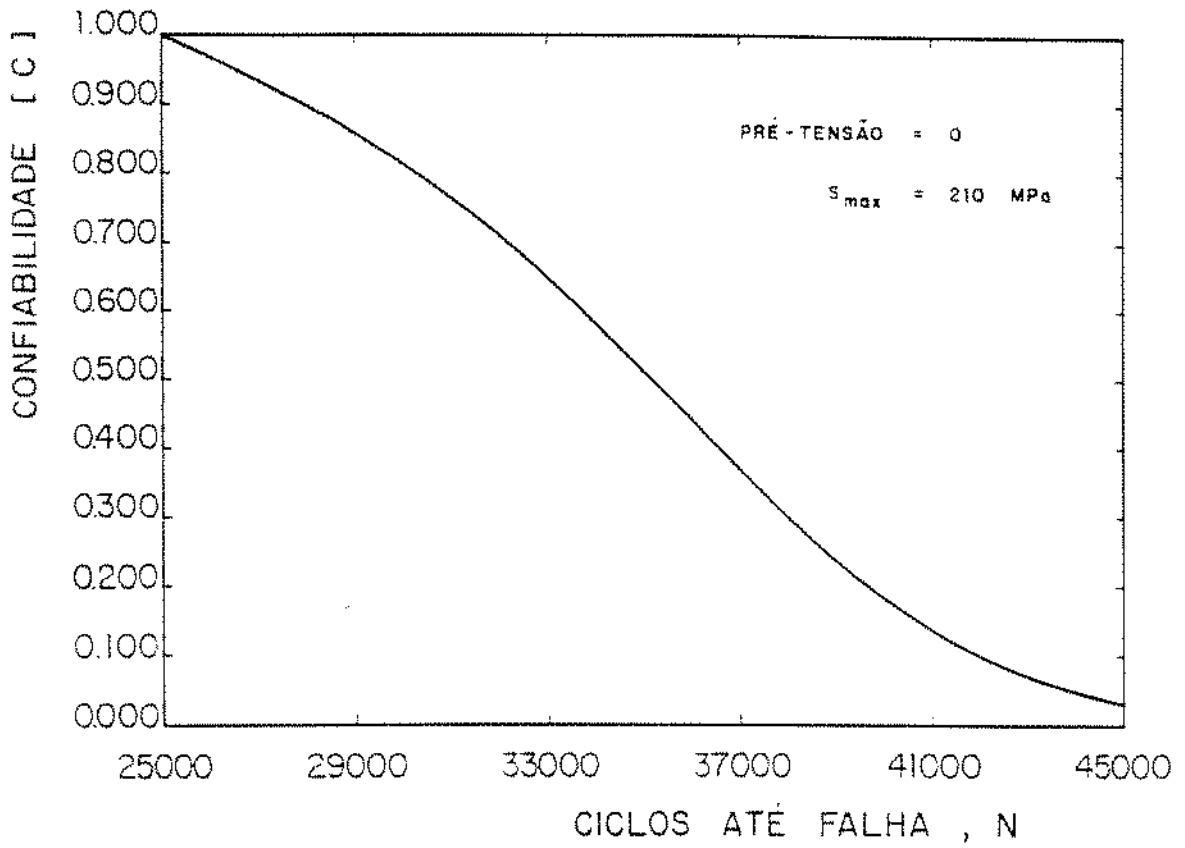


Figura 7.1 - Curva de Confiabilidade para pré-tensão = 0

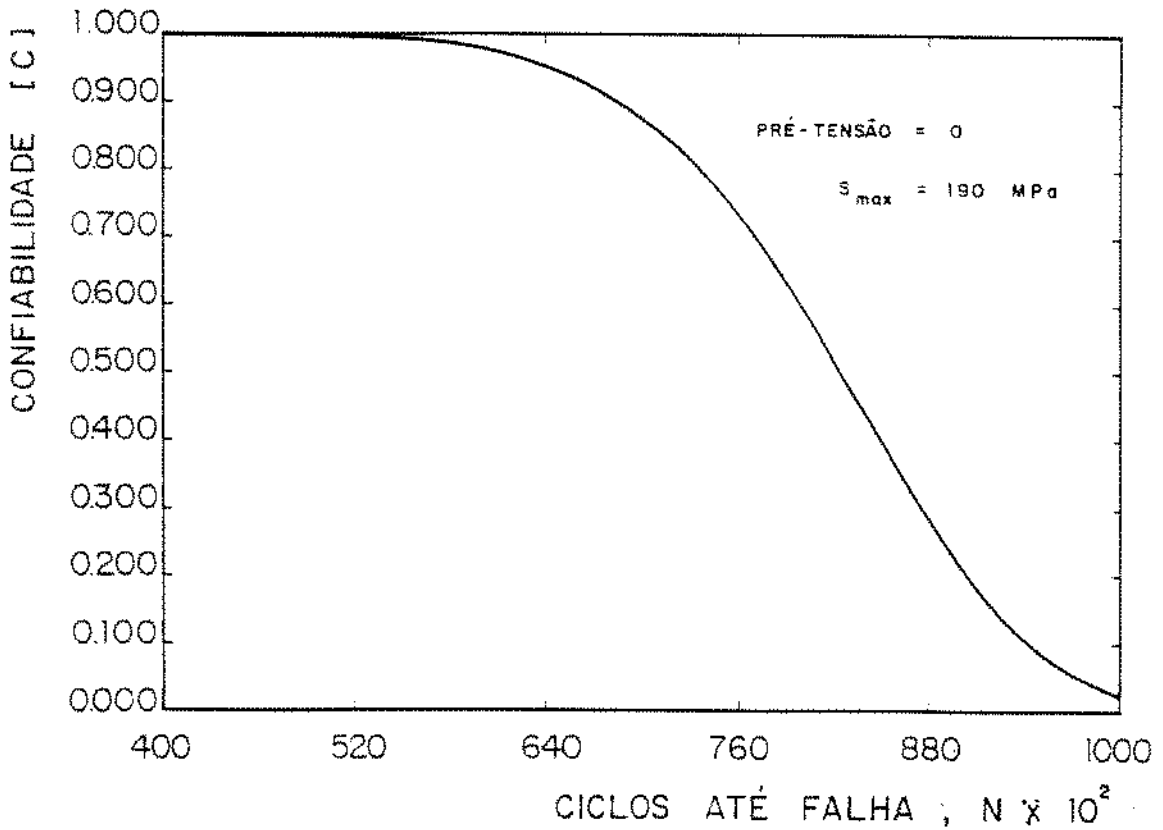


Figura 7.2 Curvas de Confiabilidade para pré-tensão = 0

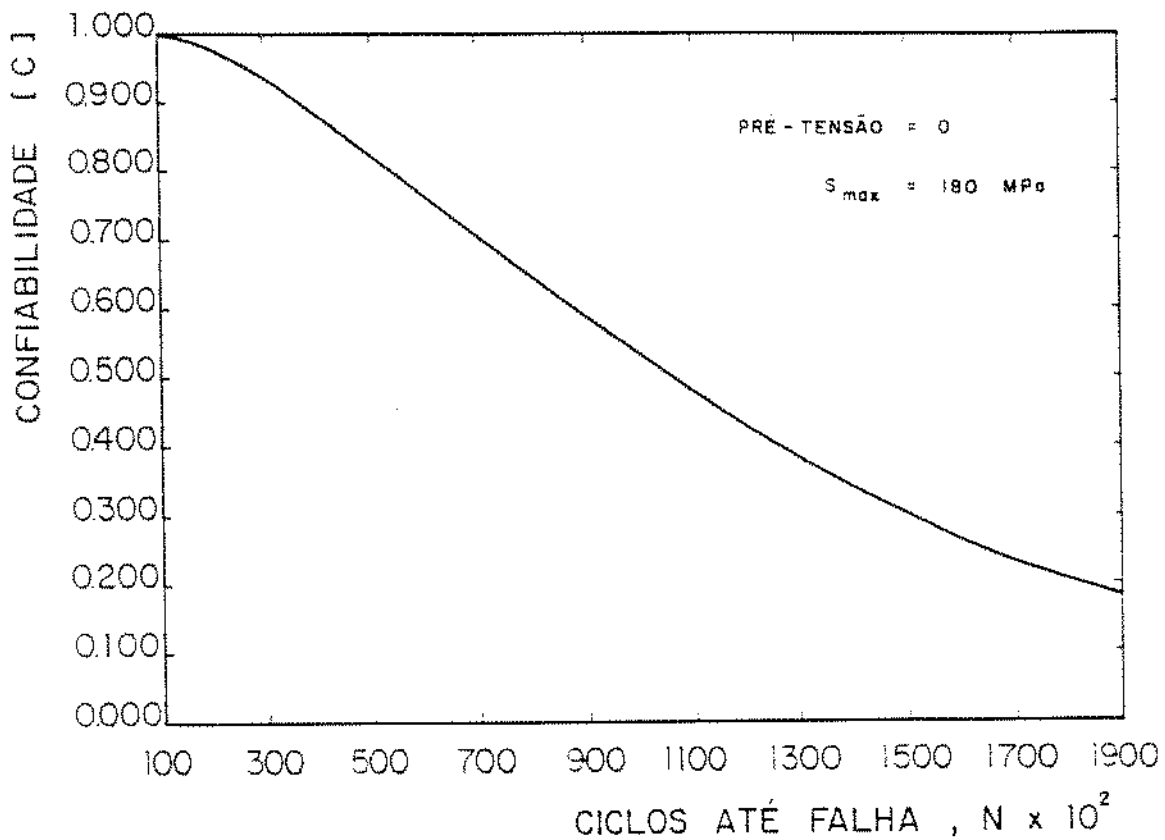


Figura 7.3 Curvas de Confiabilidade para pré-tensão = 0

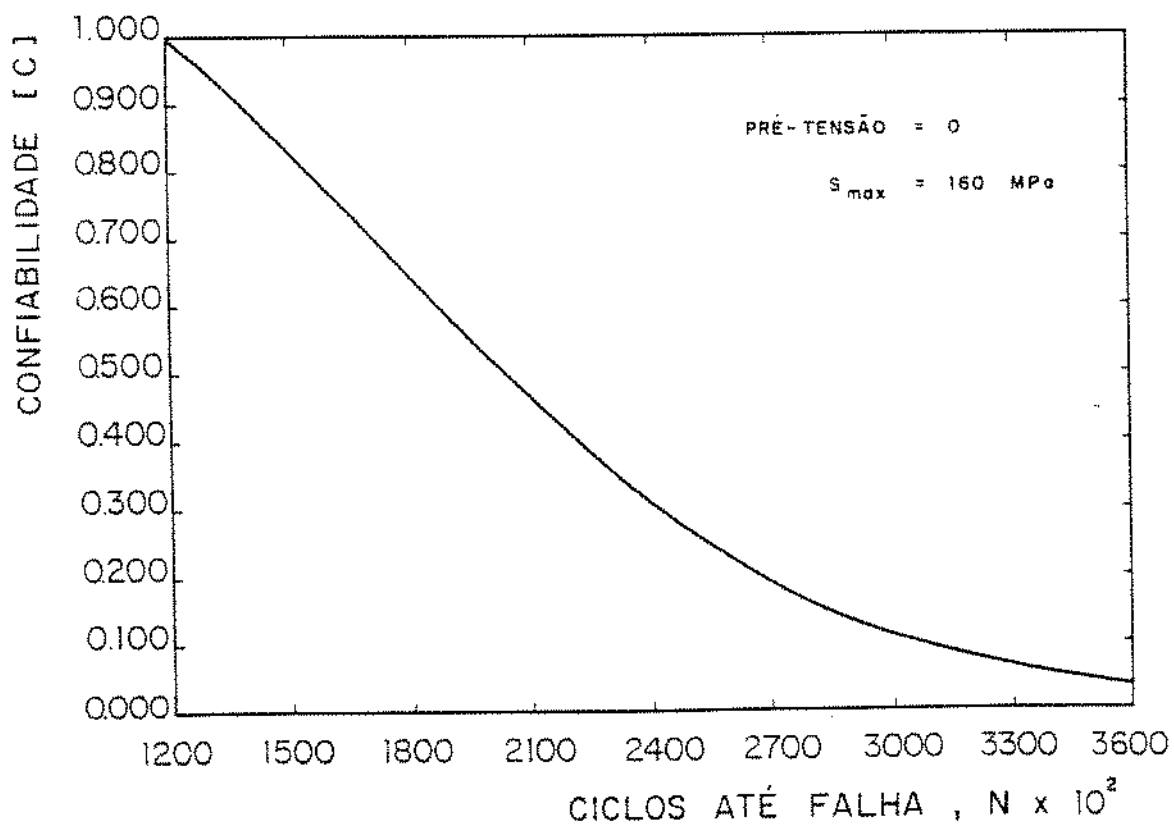


Figura 7.4 Curvas de Confiabilidade para pré-tensão = 0

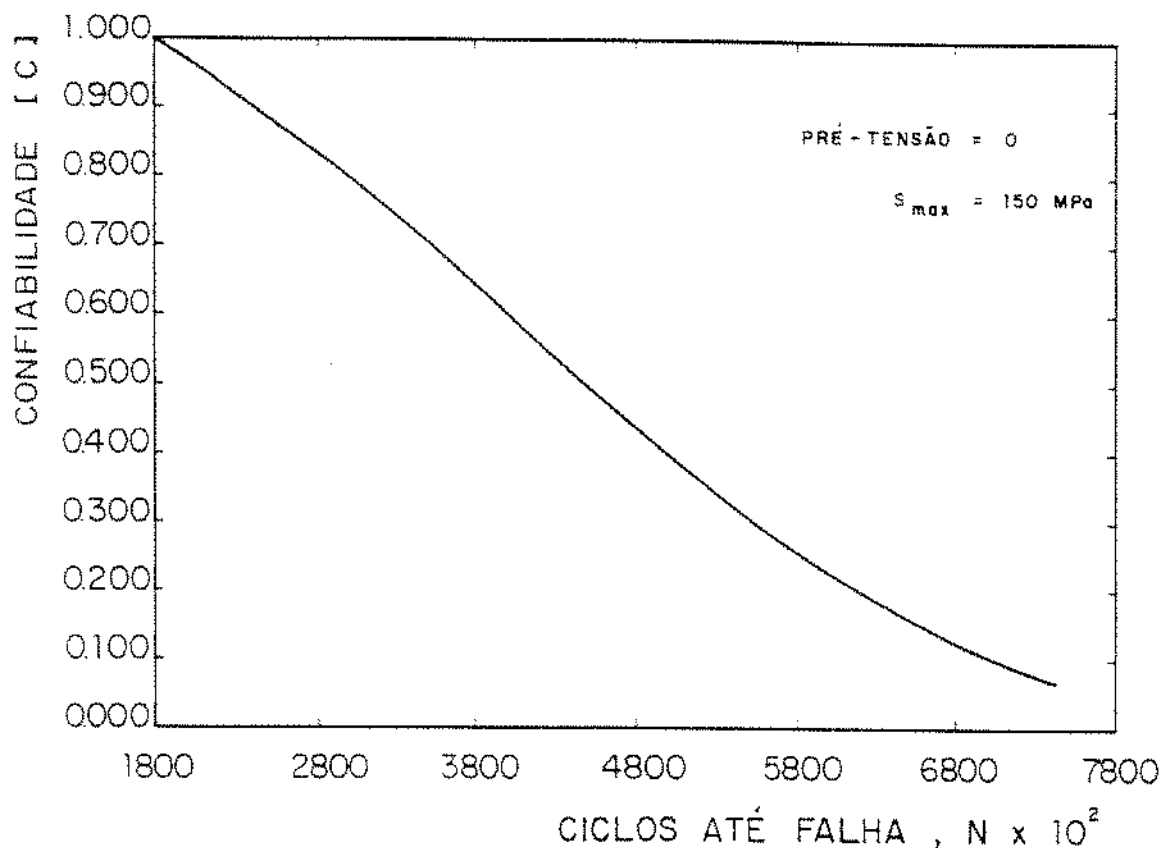


Figura 7.5 Curvas de Confiabilidade para pré-tensão = 0

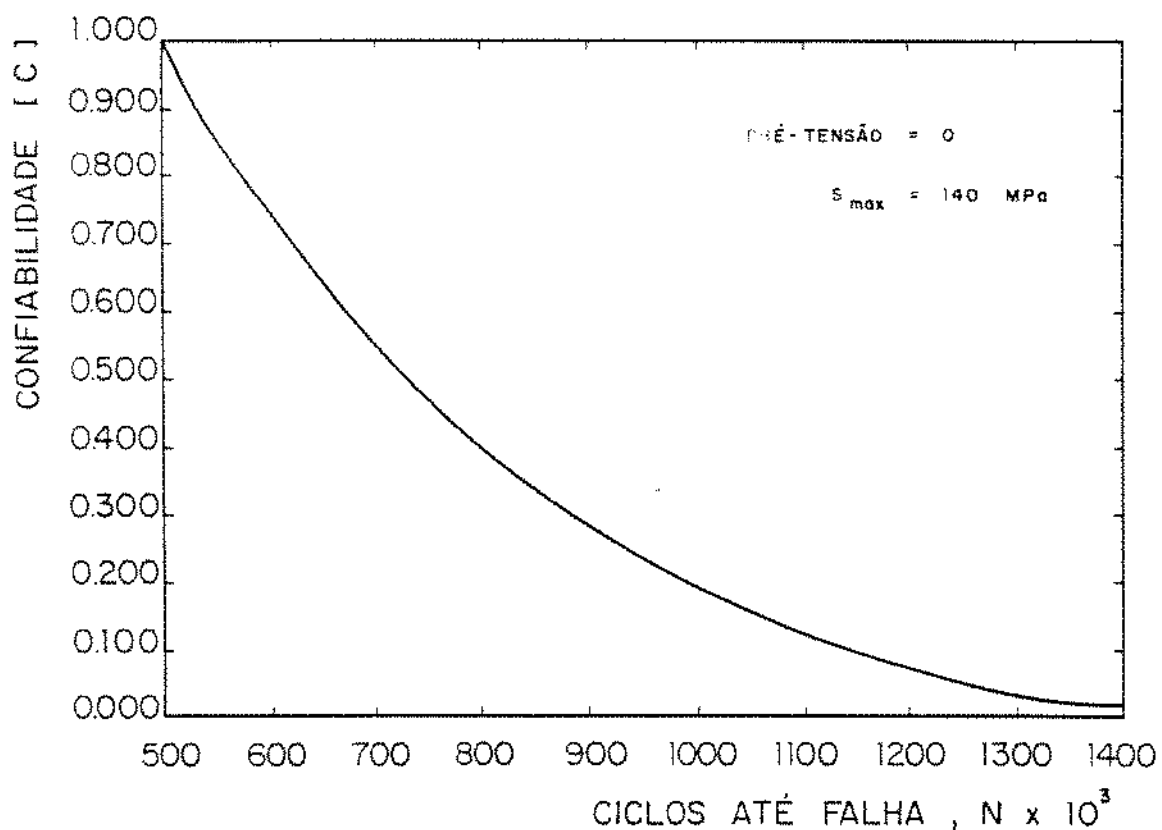


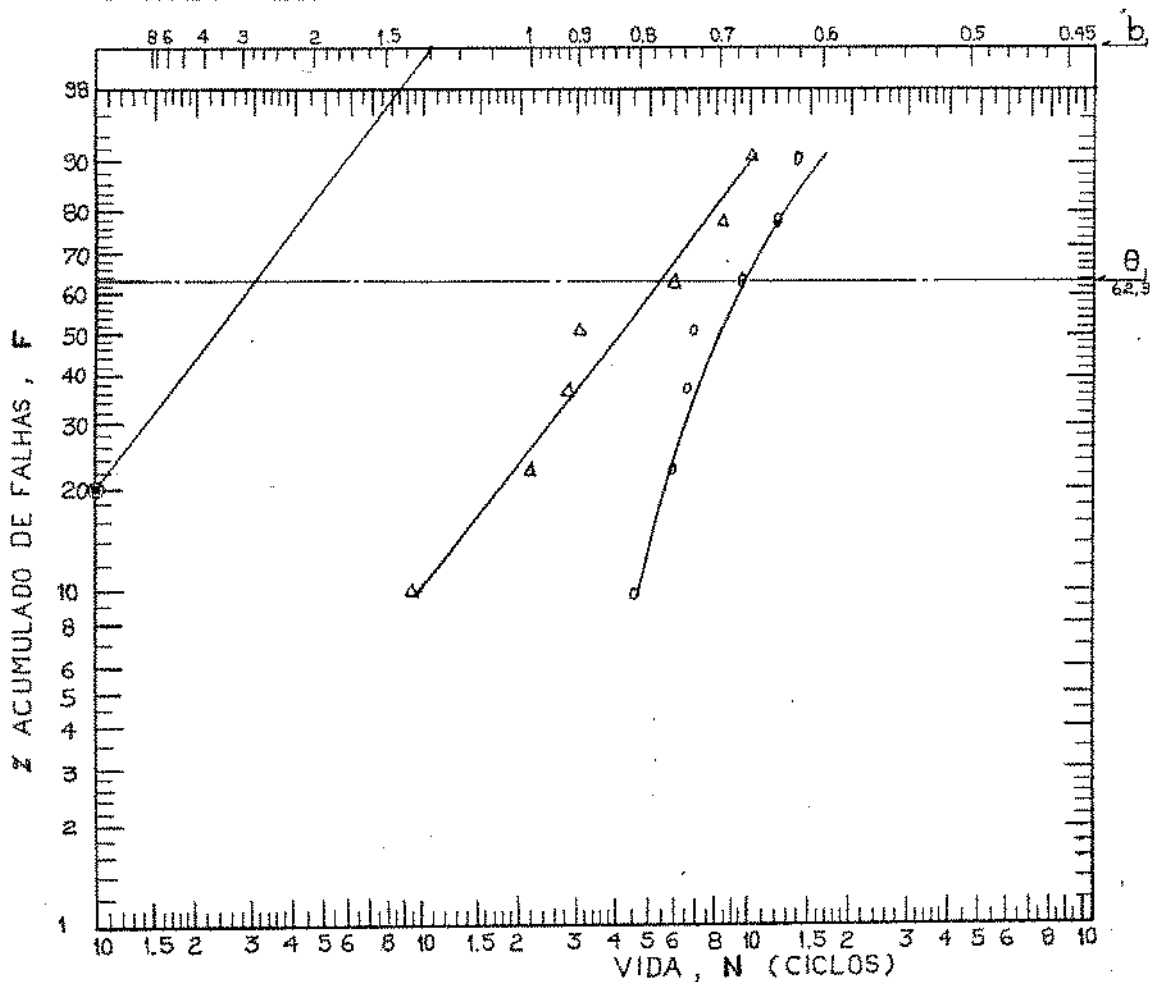
Figura 7.6 Curvas de Confiabilidade para pré-tensão = 0

Tabela 7.2 - Determinação dos Valores das constantes da equação de Weibull com pré-tensão de -41,3 MPa

Nível de Tensão S <sub>a</sub> [MPa]	Número Ordem i	Grau Médio % *1	Ciclos até falha N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Menor Valor da falha N <sub>1</sub> x 10 <sup>2</sup>	Maior Valor da falha N <sub>h</sub> x 10 <sup>2</sup>	Valor Médio da falha N <sub>m</sub> x 10 <sup>2</sup>	Parâmetro de posição a x 10 <sup>2</sup> *4	Falha corrigida N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Fator de Forma b *4	Fator de Escala c x 10 <sup>2</sup>
1	1	9,428	45,00					9,20		
	2	22,429	57,50					21,70		
	3	36,412	64,00					28,20		
	4	50,000	66,00					30,20		
	5	63,588	95,50	45,00	134,90	66,00	35,80	59,70	1,30	55,00
	6	77,151	120,00					84,20		
	7	90,572	134,90					99,10		
2	1	9,428	90,00					74,20		
	2	22,429	133,00					117,20		
	3	36,412	156,00					140,20		
	4	50,000	184,00	90,00	296,00	160,00	15,80	168,20	2,25	237,00
	5	63,588	232,00					216,20		
	6	77,151	281,00					265,20		
	7	90,572	296,00					280,20		
3	1	9,428	215,00					75,00		
	2	22,429	272,00					132,00		
	3	36,412	298,00					158,00		
	4	50,000	313,00	215,00	481,00	300,00	140,00	173,00	1,96	230,00
	5	63,588	327,00					187,00		
	6	77,151	438,00					298,00		
	7	90,572	481,00					341,00		
4	1	9,428	467,00					16,40		
	2	22,429	498,00					47,40		
	3	36,412	557,00					106,40		
	4	50,000	572,00	457,00	1320,00	450,50	450,60	121,40	0,83	244,00
	5	63,588	695,00					244,40		
	6	77,151	867,00					416,40		
	7	90,572	1320,00					849,00		

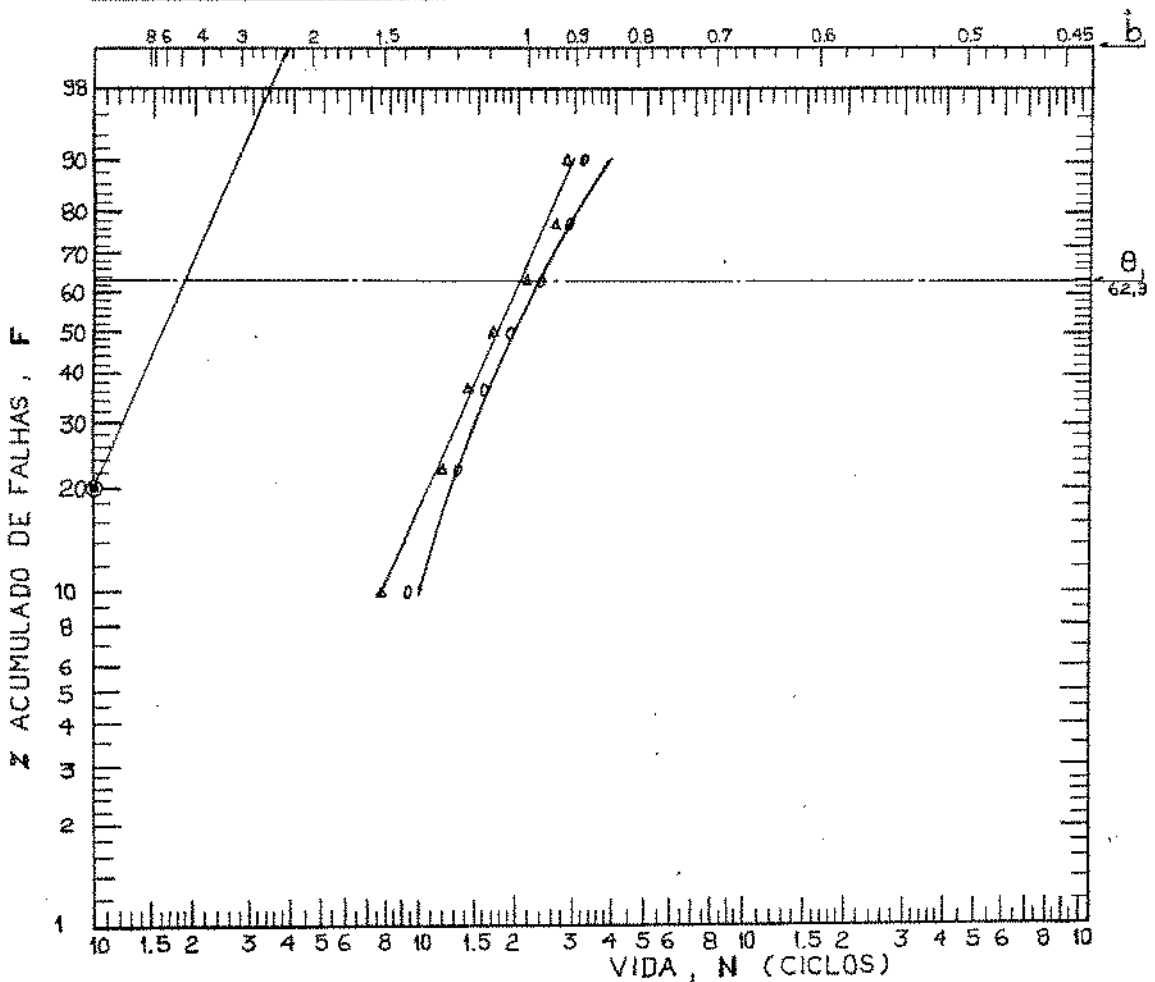
Notas: \*1 - conforme ABNT - NBR 6742  
 \*2 - valores medidos em ensaio  
 \*3 - Valor médio conforme ABNT - NBR 6742  
 \*4 - conforme ABNT - NBR 9321

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 01	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 01/4	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa- $S_m = -41,3$ MPa- $S_a = 210$ MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 35.800$	FATOR DE FORMA $b = 1,3$	FATOR DE ESCALA $\theta = 55.000$



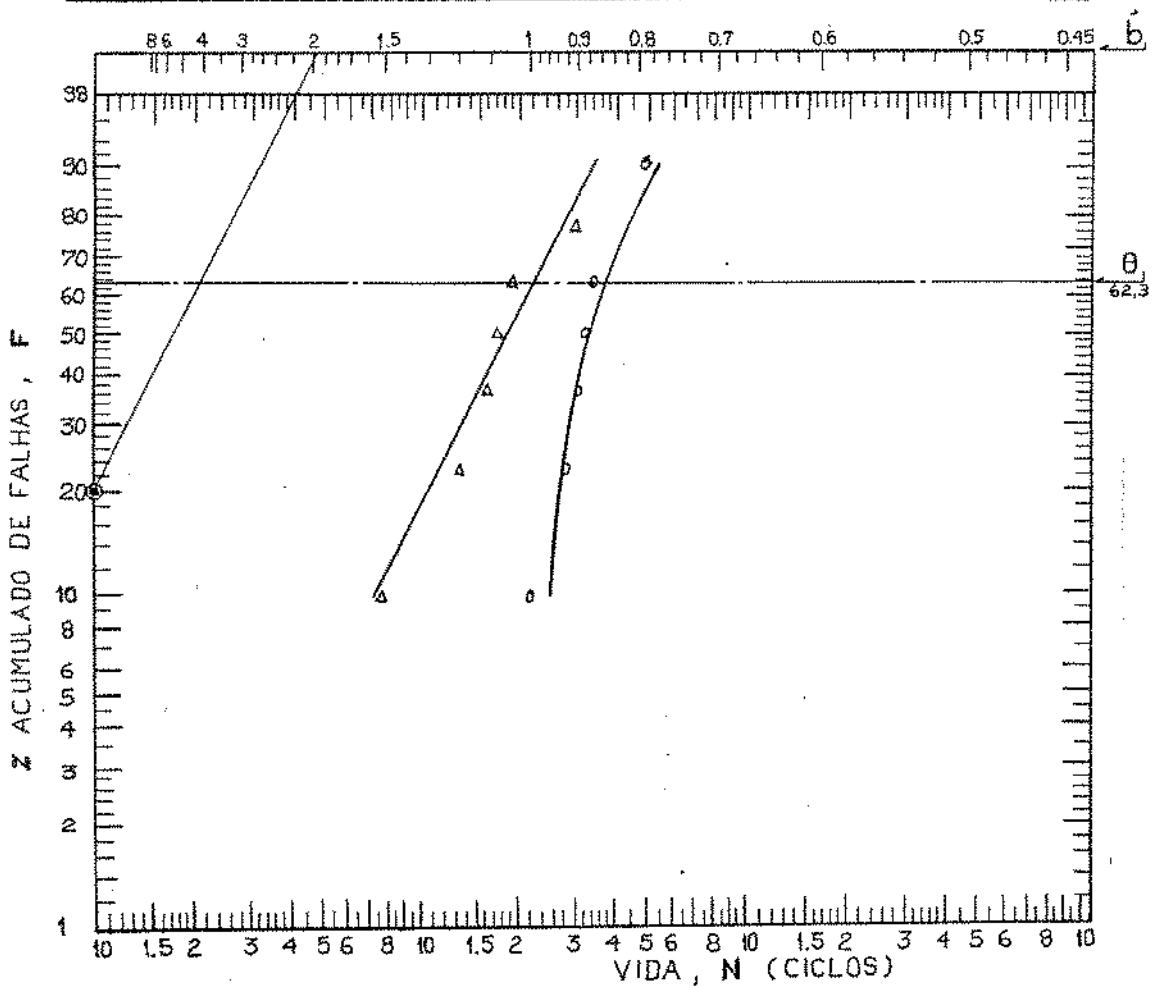
Ensaio número 1 (pré-tensão = -41,3 MPa)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 02	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 02/4	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa-Sm=-41,3MPa-Sa=190 MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO a = 15.800	FATOR DE FORMA b = 2,25	FATOR DE ESCALA θ = 207.000



Ensaio número 2 (pré-tensão = -41,3 MPa)

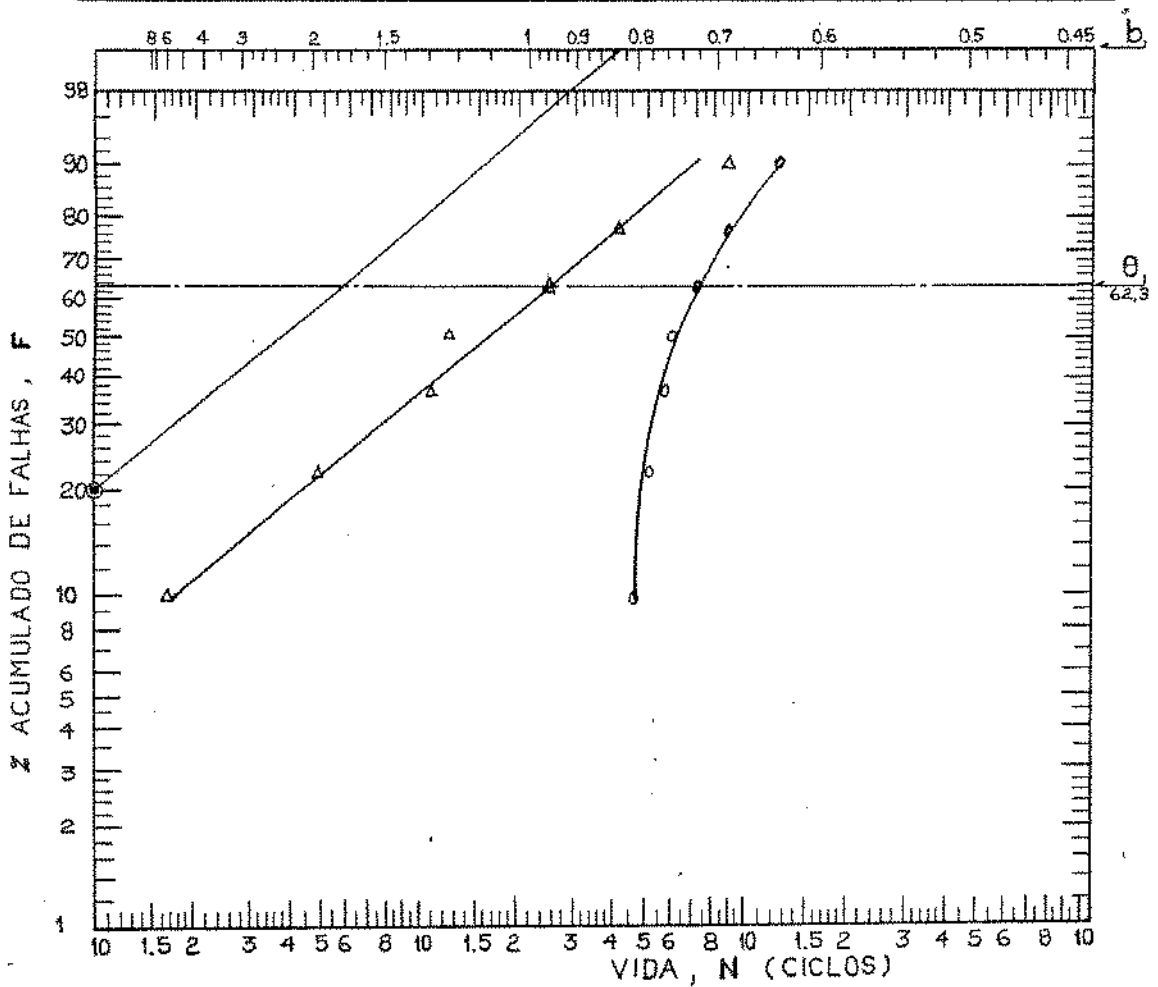
GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 03	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 03/4	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa-Sm=-41,3 MPa-Sa=180 MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 140.000$	FATOR DE FORMA h = 1,96	FATOR DE ESCALA $\theta = 230.000$



Ensaio número 3 (pré-tensão = -41,3 MPa)



GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 04	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 04/4	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa- $S_m = -41,3\text{MPa}$ $S_a = 160\text{MPa}$		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 450.600$	FATOR DE FORMA $b = 0,83$	FATOR DE ESCALA $\theta = 244.000$



Ensaio número 4 (pré-tensão = -41,3 MPa)

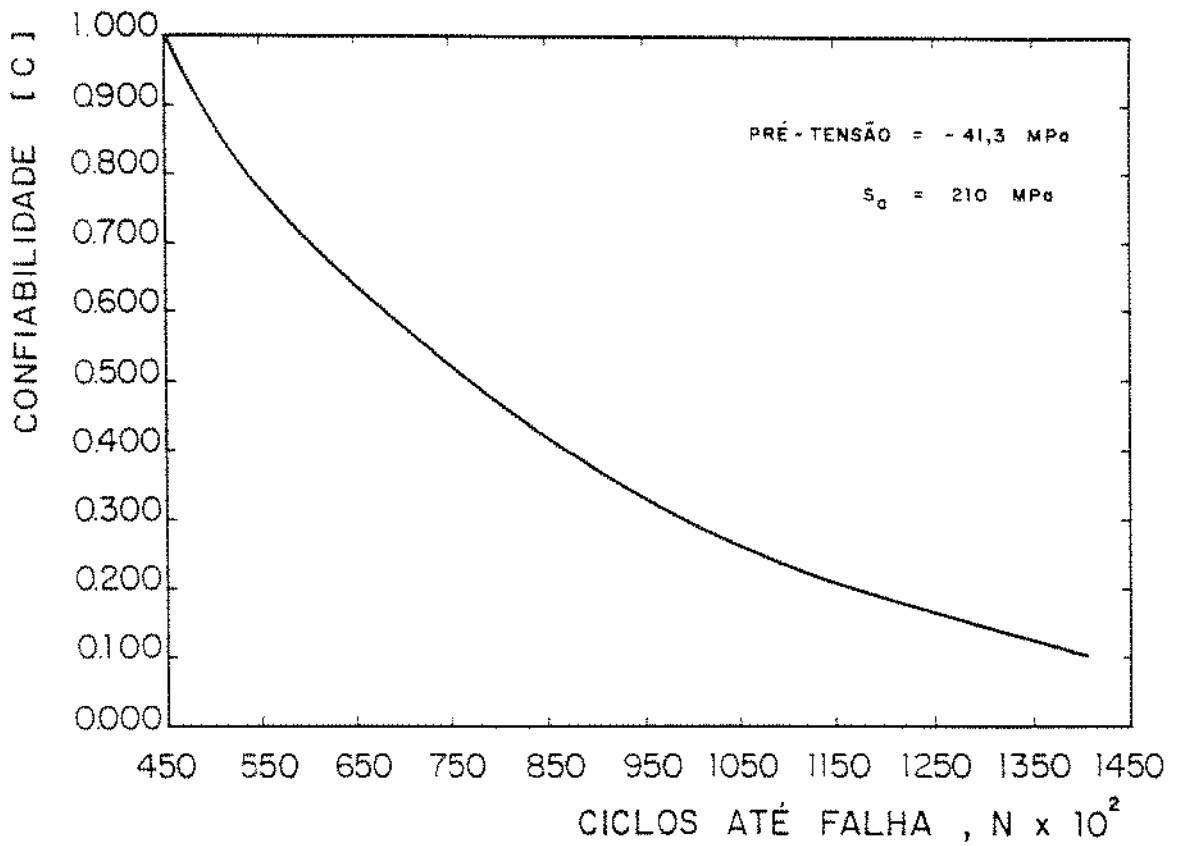


Figura 7.7 - Curva de Confiabilidade para pré-tensão = - 41,3 MPa

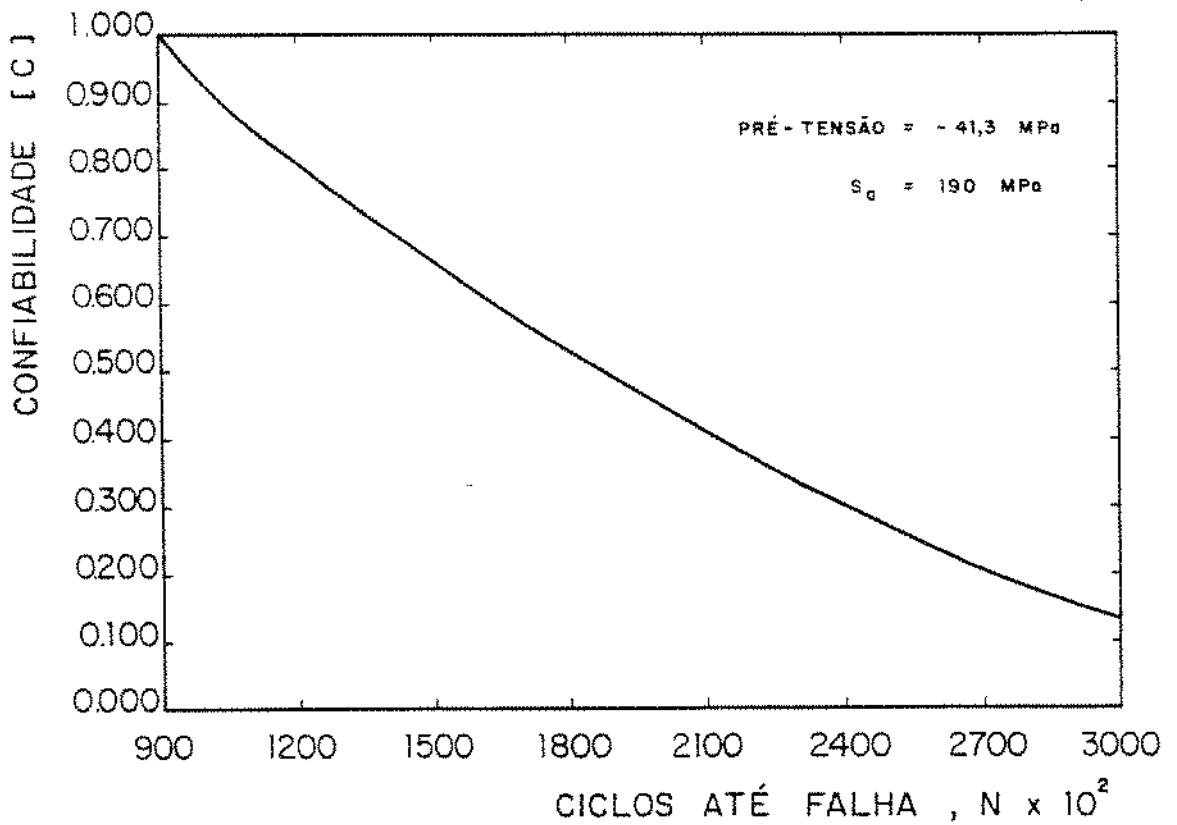


Figura 7.8 - Curva de Confiabilidade para pré-tensão = - 41,3 MPa

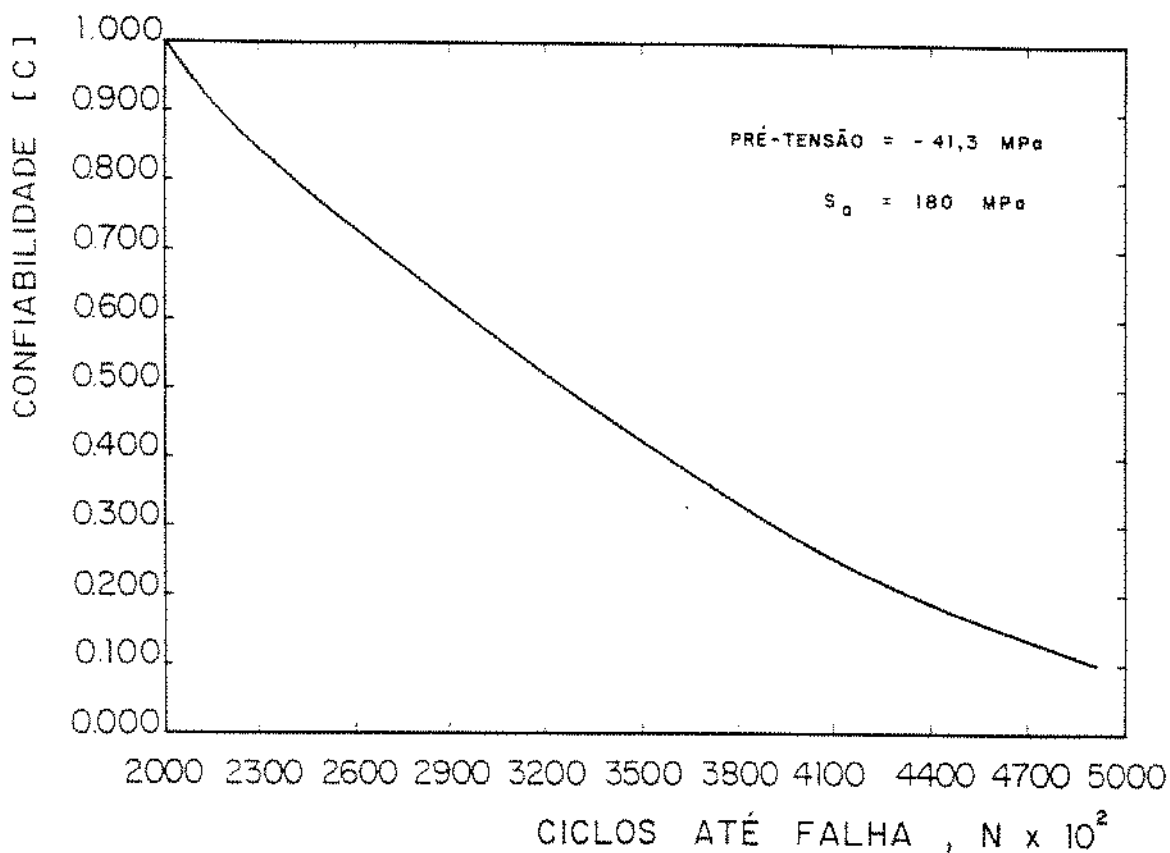


Figura 7.9 - Curvas de Confiabilidade para pré-tensão = - 41,3 MPa

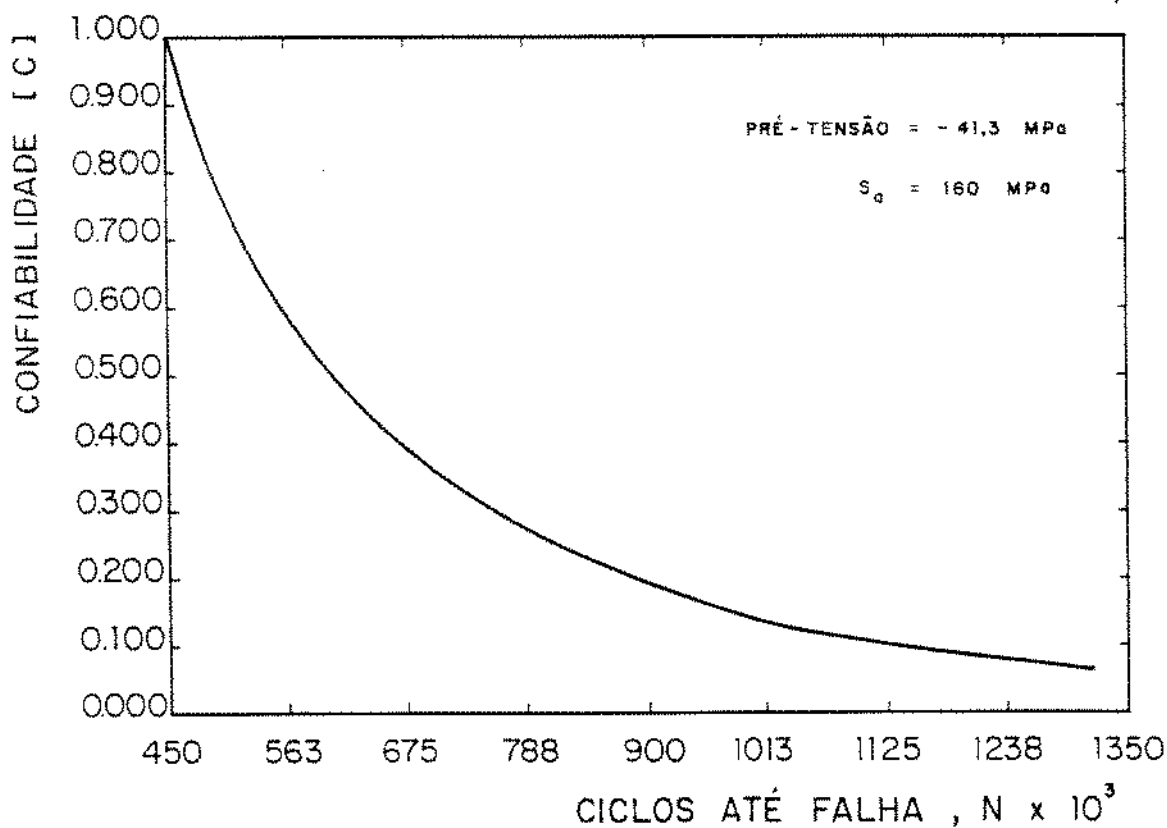


Figura 7.10 - Curva de Confiabilidade para pré-tensão = - 41,3 MPa

## 7.5 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O SEGUNDO NÍVEL DE PRÉ-TENSÃO

A Tabela 7.3 resume os resultados obtidos com o segundo nível de pré-tensão, ou seja, -53,7 MPa. As constantes de Weibull também estão relacionadas para os diversos níveis de tensão com esse nível de pré-tensão.

Os GPW relativos aos ensaios números 01 a 03, com pré-tensão = - 53,7 MPa, mostram as curvas originais e retificadas, considerando o número de ciclos até falha x percentagem acumulada de falhas. Essas curvas foram utilizadas para a determinação das constantes de Weibull.

As Figura 7.11 a 7.13 mostram as curvas de Confiabilidade para os níveis de tensão aplicadas, obtidas quando se empregam os valores de  $b$ ,  $\theta$  e  $\hat{\alpha}$  na equação de Weibull. Os resultados numéricos são apresentados em anexo.

## 7.6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O TERCEIRO NÍVEL DE PRÉ-TENSÃO

Para esse último nível de pré-tensão, ou seja, - 66,0 MPa os resultados estão resumidos na Tabela 7.4. Os GPW relativo aos ensaios números 01 e 02, com pré-tensão de -66,0 MPa, mostram as curvas originais e retificadas, decorrentes dos número de ciclos até falha x percentagem acumulada de falhas, resultantes desse último ensaio.

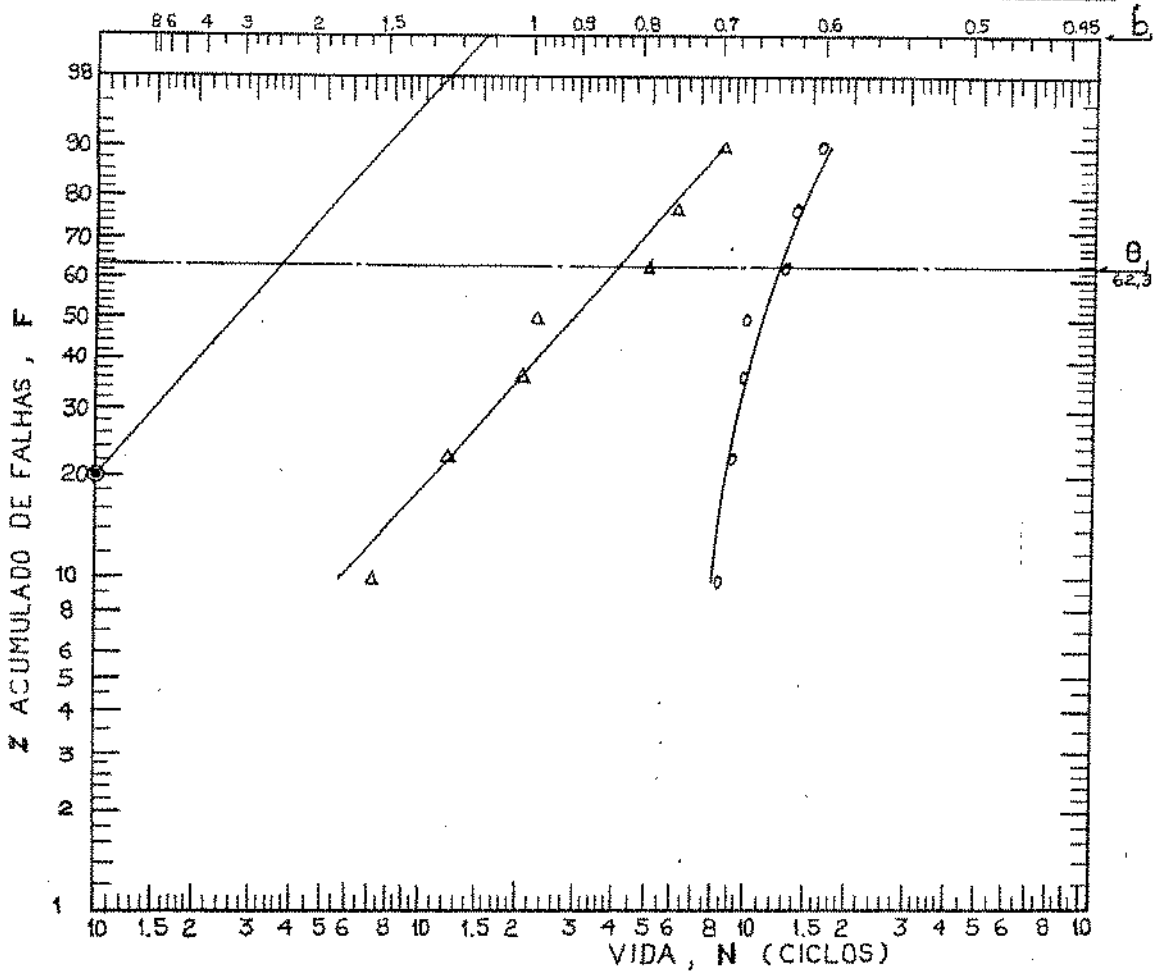
Finalmente a Figura 7.14 e 7.15 mostram as duas curvas Confiabilidade referentes aos dois níveis de tensão utilizados nesse ensaio. Os valores Numéricos da Confiabilidade estão em anexo.

Tabela 7.3 - Determinação dos valores das constantes da equação de Weibull com pré-tensão de -53,7 MPa

Nível de Tensão S <sub>a</sub> [MPa]	Número Ordem i	Grau Médio %	Ciclos até falha N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Menor Valor da falha N <sub>1</sub> x 10 <sup>2</sup>	Maior Valor da falha N <sub>h</sub> x 10 <sup>2</sup>	Valor Médio da falha N <sub>m</sub> x 10 <sup>2</sup>	Parâmetro de posição a x 10 <sup>2</sup>	Falha corrigida N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Fator de Forma de Forma b	Fator de Escala c x 10 <sup>2</sup>
1	210	1	83,00					7,00		
		2	88,50					12,00		
		3	96,00					20,00		
		4	98,00					22,00	1,11	42,00
		5	125,00	83,00	159,00	100,00	76,00	49,00		
		6	136,00	159,00				60,00		
		7	159,00	115,00				83,00		
2	190	1	115,00					16,70		
		2	133,00					34,70		
		3	171,00					72,70		
		4	207,00	115,00	423,00	173,00	98,30	108,70	1,00	150,00
		5	235,00	207,00				136,70		
		6	324,00	324,00				225,70		
		7	423,00	423,00				324,70		
3	180	1	246,00					53,30		
		2	285,00					92,30		
		3	326,00					133,30		
		4	374,00	246,00	596,00	326,00	192,70	181,30	1,54	235,00
		5	437,00	374,00				244,30		
		6	481,00	437,00				288,30		
		7	526,00	526,00				333,30		

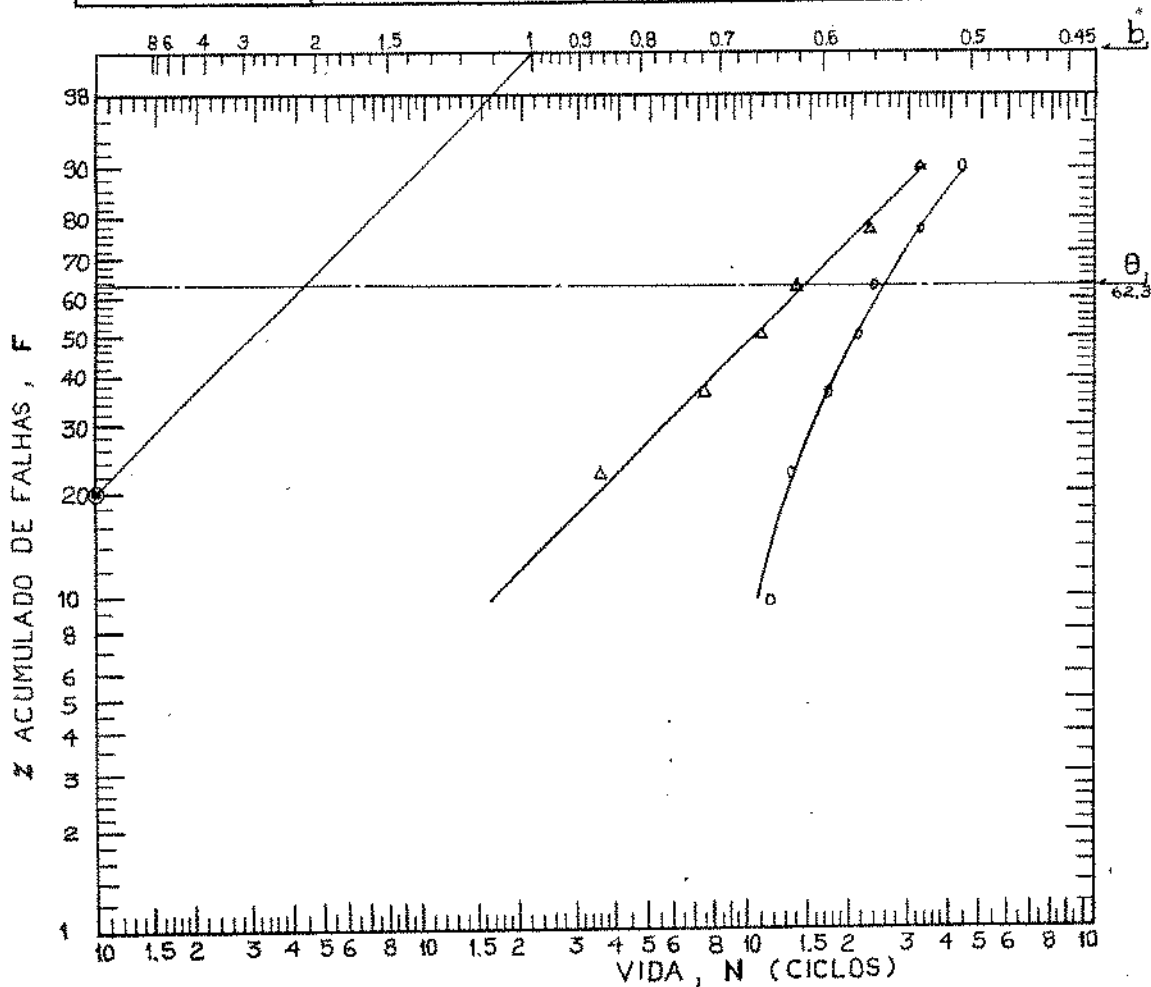
Notas: \*1 - conforme ABNT - NBR 6742  
 \*2 - valores medidos em ensaio  
 \*3 - Valor médio conforme ABNT - NBR 6742  
 \*4 - conforme ABNT - NBR 9321

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 01	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 01/3	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa-SM=-53,7MPa Sa=210MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{\theta} = 76.000$	FATOR DE FORMA $b = 1,11$	FATOR DE ESCALA $\theta = 42.000$



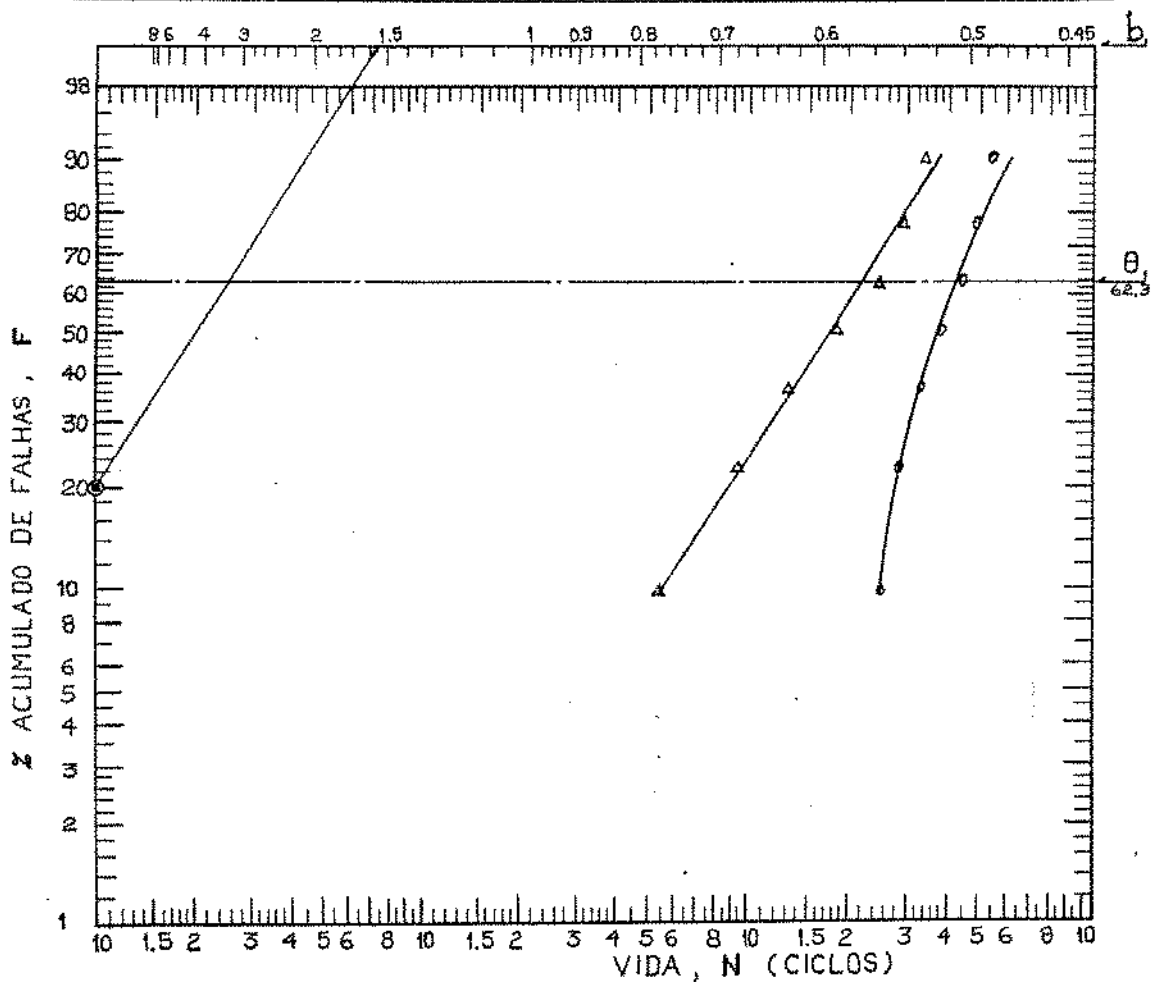
Ensaio número 1 (pré-tensão de -53,7 MPa)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 02	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 02/03	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa-Sm=-53,7MPa Sa=190MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 98.300$	FATOR DE FORMA $b = 1,00$	FATOR DE ESCALA $\theta = 150.000$



Ensaio número 2 (pré-tensão de -53,7 MPa)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 03	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 03/03	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa-Sm=-53,7MPa Sa=180MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 192.700$	FATOR DE FORMA $b = 1,54$	FATOR DE ESCALA $\theta = 225.000$



Ensaio número 3 (pré-tensão de - 53,7 MPa)



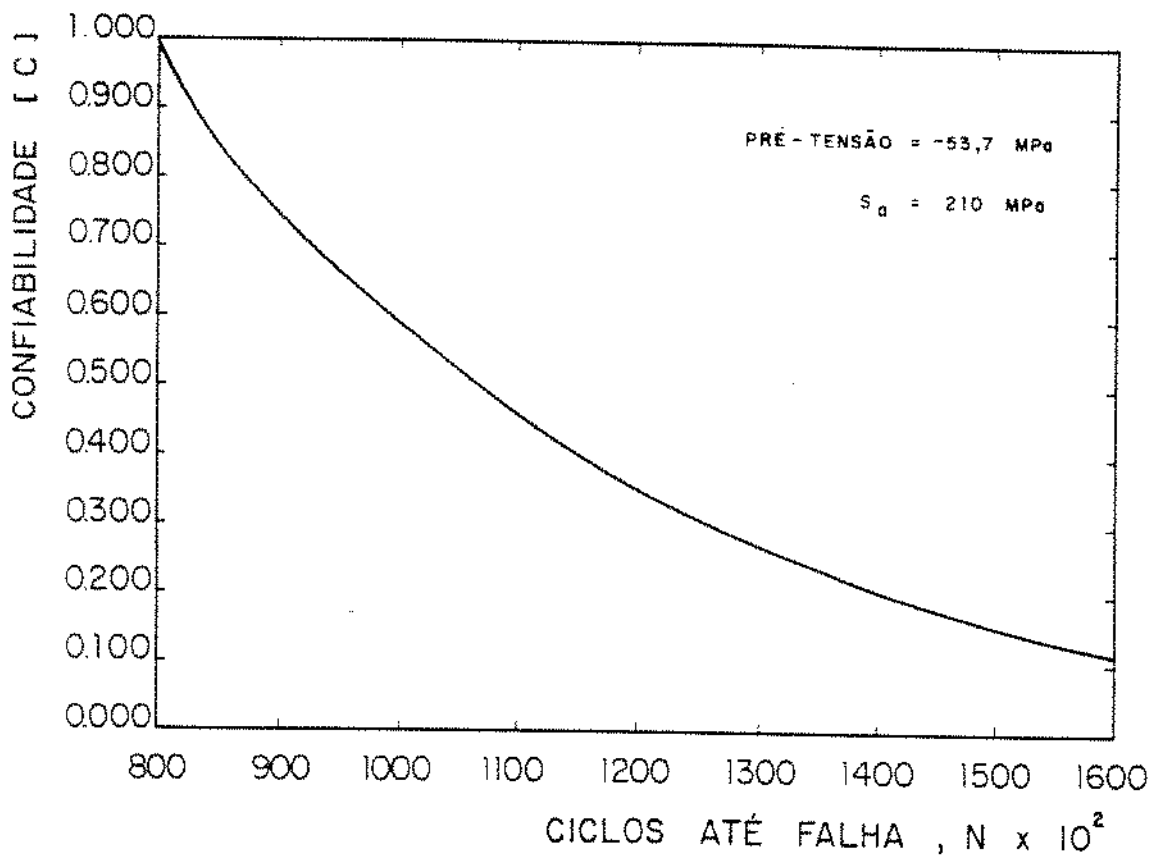


Figura 7.11 - Curvas de Confiabilidade para pré-tensão de -53,7 MPa

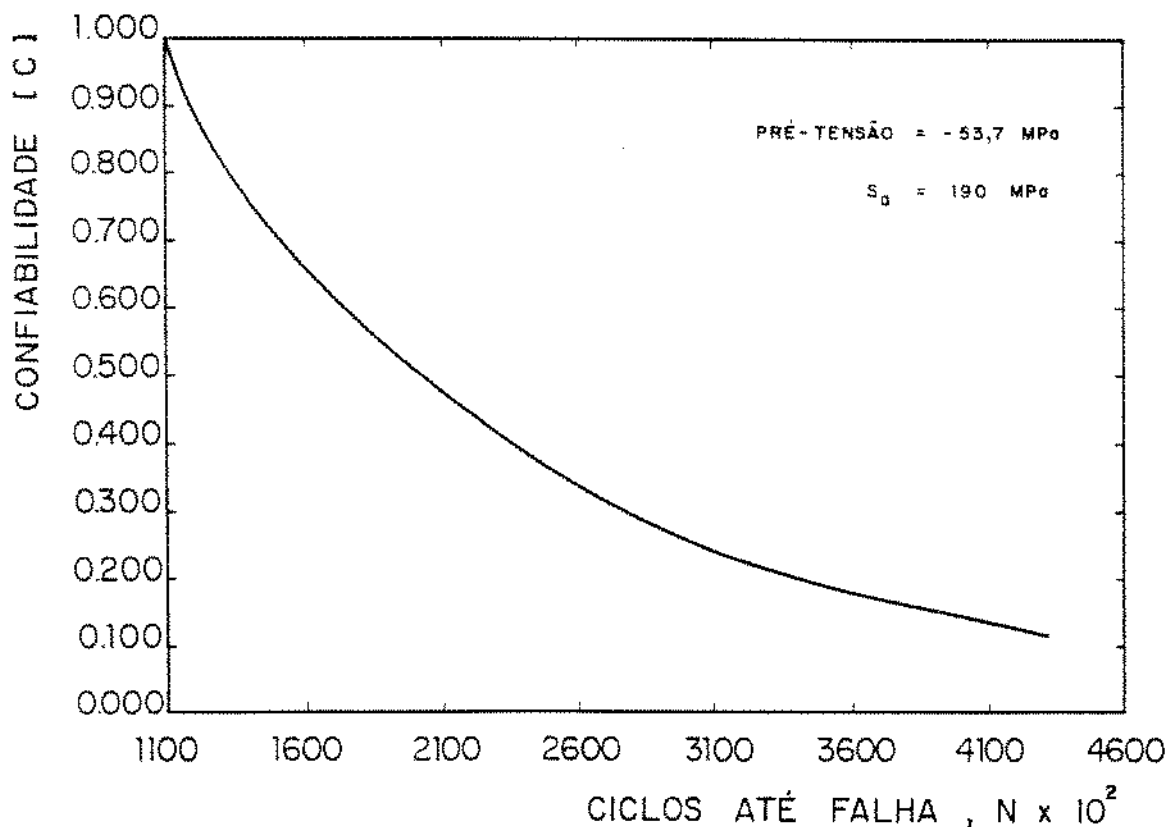


Figura 7.12 - Curvas de Confiabilidade para pré-tensão de -53,7 MPa

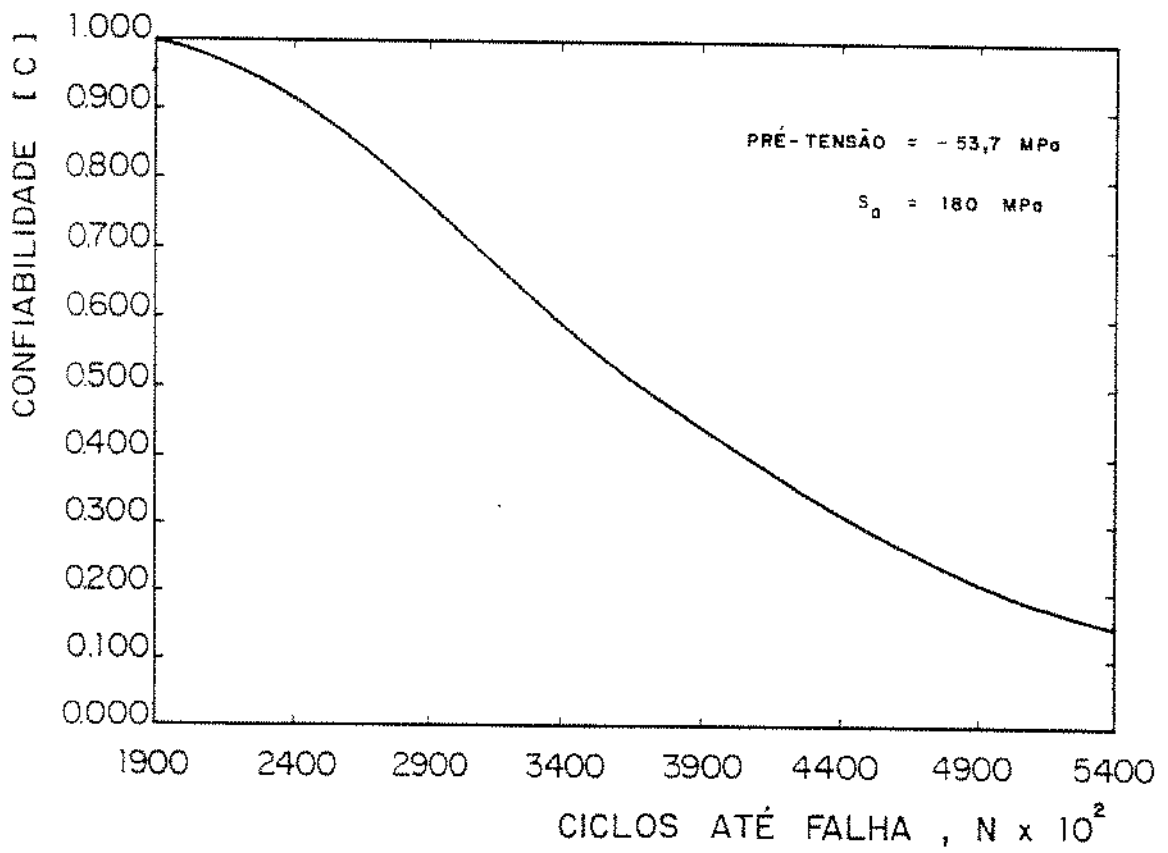


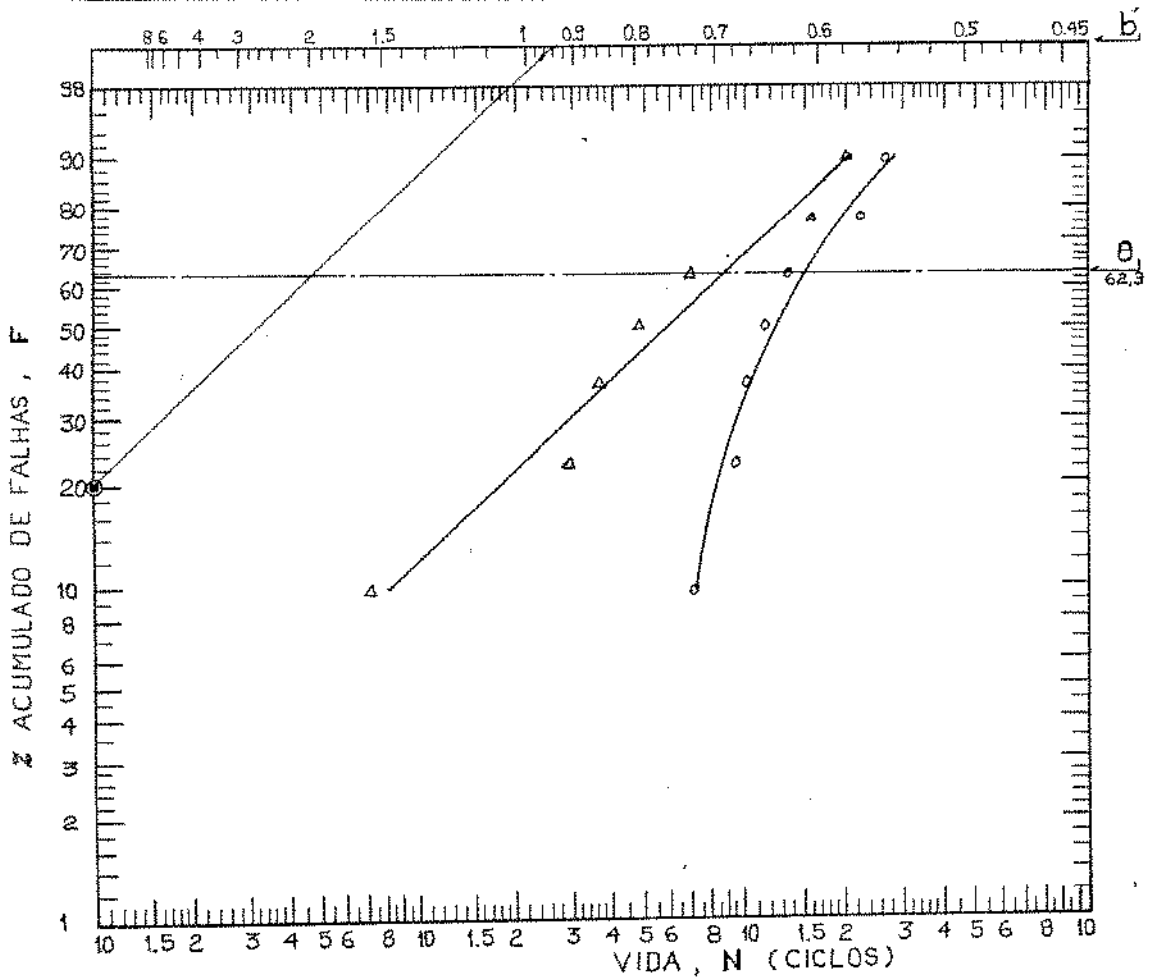
Figura 7.13 - Curvas de Confiabilidade para pré-tensão de -53,7 MPa

Tabela 7.4 - Determinação dos Valores das constantes da equação de Weibull com pré-tensão de -66,0 MPa

Nível de Tensão S <sub>o</sub> (MPa)	Número Ordem i	Grau Médio %	Ciclos até falha N <sub>i</sub> x 10 <sup>2</sup>	Menor Valor da falha N <sub>1</sub> x 10 <sup>2</sup>	Maior Valor da falha N <sub>h</sub> x 10 <sup>2</sup>	Valor Médio da falha N <sub>m</sub> x 10 <sup>2</sup>	Parâmetro de posição a x 10 <sup>3</sup>	Falha corrigida N <sub>i</sub> x 10 <sup>4</sup>	Fator de Forma b	Fator de Escala c x 10 <sup>5</sup>	
1	210										
		1	9,428	72,00				7,00			
		2	22,429	94,00				29,00			
		3	36,412	100,00				36,00			
		4	50,000	113,00	72,00	263,00	102,00	55,00	48,00	0,94	90,00
		5	63,588	132,00					67,50		
		6	77,151	221,00					154,00		
2		7	90,572	253,00				198,00			
		1	9,428	161,00				60,20			
		2	22,429	166,00				65,20			
		3	36,412	229,00				128,20			
		4	50,000	257,00	161,00	357,00	225,00	100,00	136,20	1,08	175,00
		5	63,588	320,00					159,20		
		6	77,151	320,00					219,20		
	7	90,572	357,00					256,20			

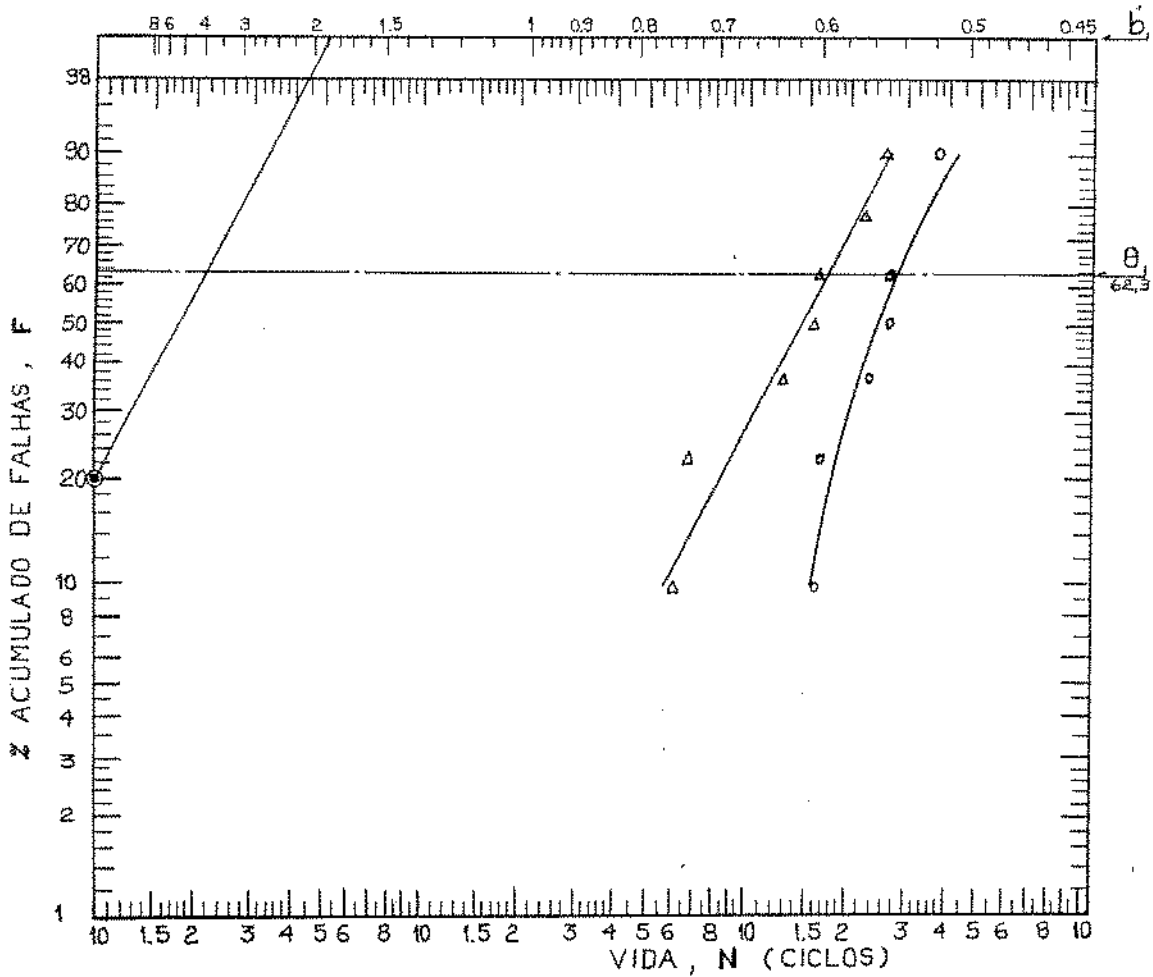
Notas: \*1 - conforme ABNT - NBR 6742  
 \*2 - valores médios em ensaio  
 \*3 - Valor médio conforme ABNT - NBR 6742  
 \*4 - conforme ABNT - NBR 9321

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 01	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 01/2	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa-Sm=-66,0MPa Sa=210MPa		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $a=65.000$	FATOR DE FORMA $b=0,94$	FATOR DE ESCALA $\theta=90.000$



Ensaio número 01 (pré-tensão de -66,0 MPa)

GRÁFICO DE PROBABILIDADE - "WEIBULL" (GPW)			
ENSAIO Nº 02	PEÇA Corpo de prova com pré-tensão	FOLHA Nº 02/2	
TIPO DE ENSAIO Flexão Rotativa- $S_m = -66,0 \text{ MPa}$ $S_a = 190 \text{ MPa}$		EXECUTOR	DATA 01/90
QUANT. DA AMOSTRA 07	PARAMETRO DE POSIÇÃO $\hat{a} = 100.800$	FATOR DE FORMA $b = 1,89$	FATOR DE ESCALA $\theta = 175.000$



Ensaio número 02 (pré-tensão de -66,0 MPa)

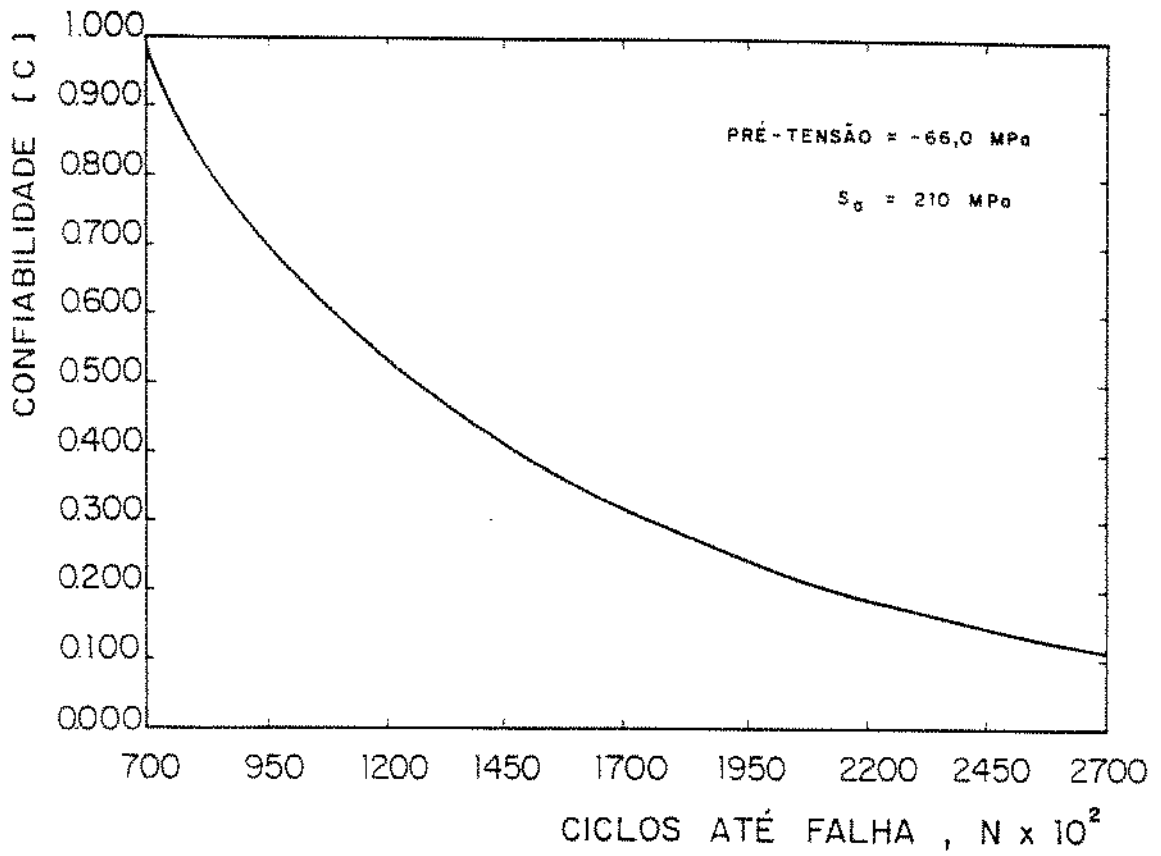


Figura 7.14 - Curvas de confiabilidade para pré-tensão de -66,0 MPa

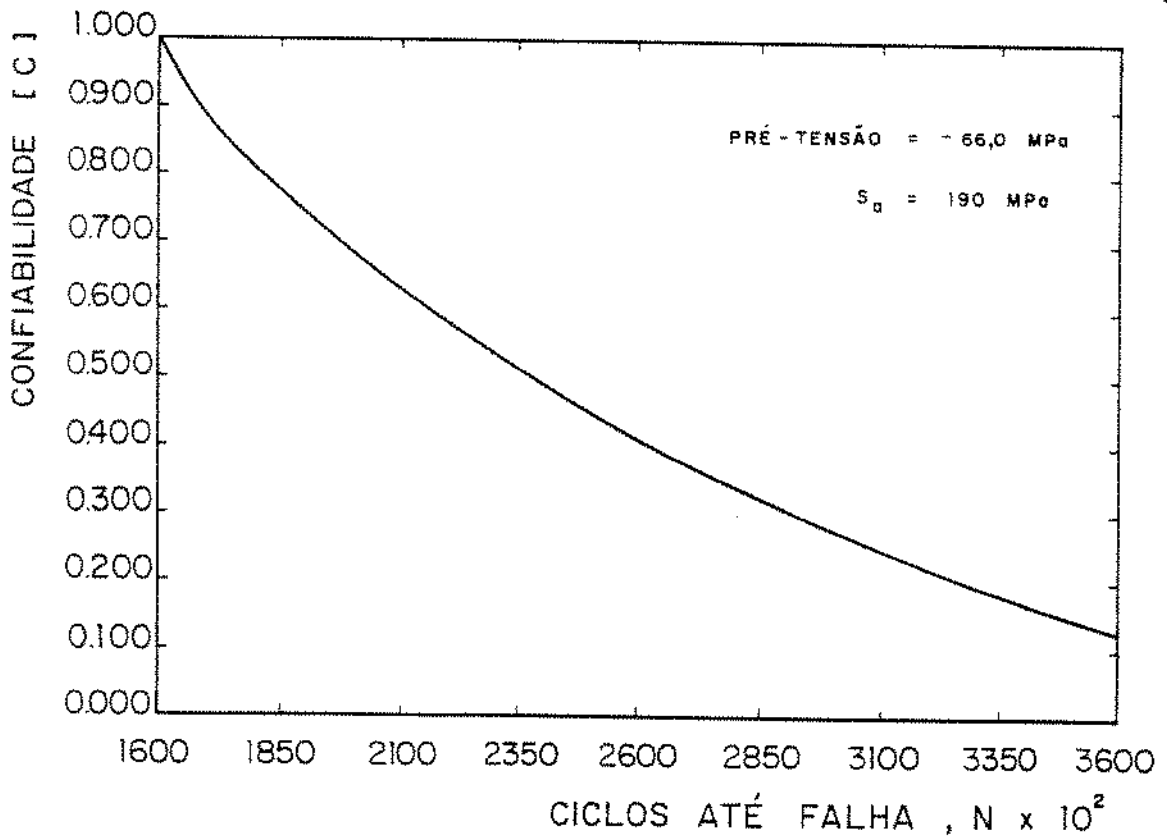


Figura 7.15 - Curvas de confiabilidade para pré-tensão de -66,0 MPa

## 7.7 DETERMINAÇÃO DA VIDA $N_{10}$

A vida  $N_{10}$  pode ser definida como o número esperado de ciclos até a ruptura com 90% de Confiabilidade. Esses valores podem ser obtidos para os diversos ensaios aqui apresentados, substituindo na equação de Weibull, os parâmetros  $b$ ,  $\theta$  e  $\hat{\sigma}$  que foram determinados, ou através dos gráficos de Confiabilidade, contidas no texto ou, ainda, dos valores (contidos em anexo) para os diversos ensaios.

A Figura 7.16 mostra a evolução da vida  $N_{10}$  para os diversos níveis de tensões em função da pré-tensão aplicada.

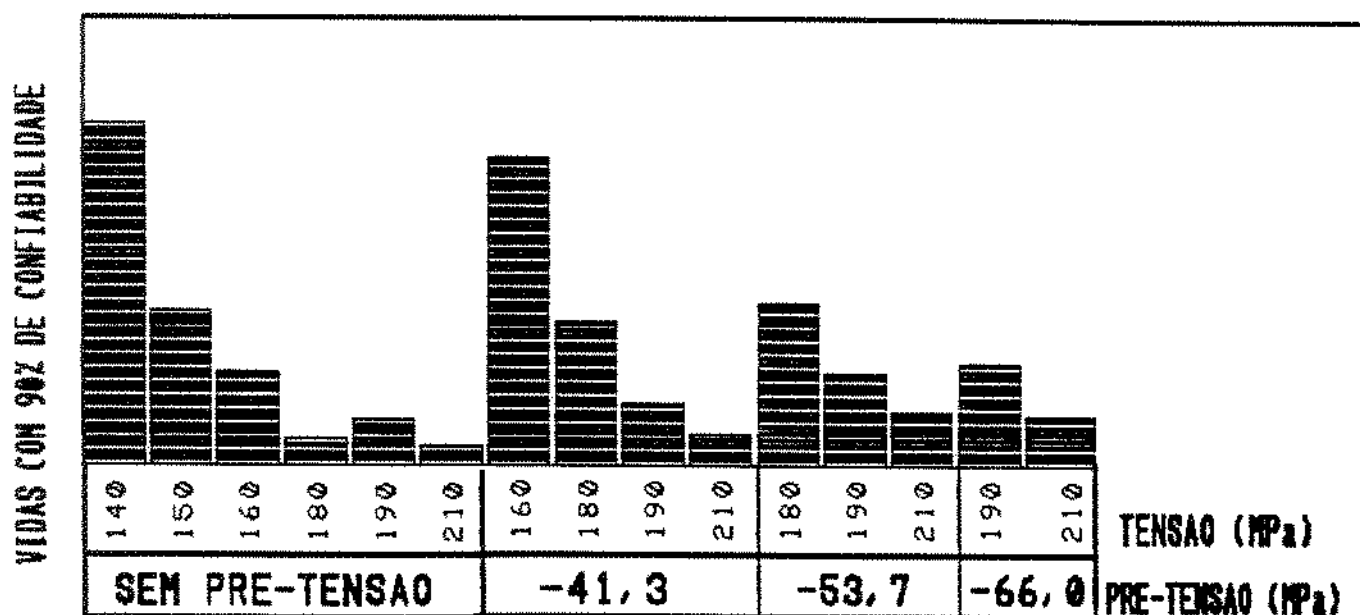


Figura 7.16 - Evolução da vida  $N_{10}$  em função da pré-tensão aplicada

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES

- 8.1 - O dispositivo de medição de forças apresentou um desempenho satisfatório e permitiu uma precisão significativa na análise dos resultados experimentais.
- 8.2 - Nos corpos de prova ensaiados sem pré-tensão, a vida em fadiga diminuiu com o aumento da tensão de flexão. Esse comportamento já era esperado e concorda com a literatura geral conhecida.
- 8.3 - Nos resultados obtidos com os corpos de prova submetidos a uma pré-tensão de  $-41,3$  MPa, a vida em fadiga apresentou um significativo aumento e o limite de resistência à fadiga apresentou um acréscimo de  $25,1\% \pm 2,2\%$  em relação ao limite de resistência à fadiga dos corpos de prova não pré-tensionados.
- 8.4 - Os resultados obtidos com os corpos de prova submetidos à uma pré-tensão de  $-41,3$  MPa, apresentam um aumento da vida em fadiga com a redução da tensão de flexão. Esses resultados concordam com o esperado e mantêm a mesma relação obtida com os corpos de prova não pré-tensionados.
- 8.5 - Nos resultados obtidos com os corpos de prova submetidos a uma pré-tensão de  $-53,7$  MPa, a vida em fadiga apresentou um significativo aumento e o limite de resistência à fadiga apresentou um acréscimo de  $6,9\% \pm 0,8\%$  em relação ao limite de resistência à fadiga dos corpos de prova pré-tensionados de  $-41,3$  MPa e de  $33,7\% \pm 3,4\%$  em relação aos corpos de



prova não pré-tensionados.

- 8.6 - Os resultados obtidos com os corpos de prova submetidos à uma pré-tensão de -53,7 MPa, apresentam um aumento da vida em fadiga com a redução da tensão de flexão. Esses resultados concordam com o esperado e mantêm a mesma relação obtida nos casos anteriores.
- 8.7 - Os resultados obtidos com os corpos de prova submetidos a uma pré-tensão de -66,0 MPa, apresentaram um significativo aumento da vida em fadiga. O limite de resistência à fadiga apresentou um acréscimo de  $8,8\% \pm 0,9\%$  em relação ao limite de resistência à fadiga dos corpos de prova pré-tensionados de -53,7 MPa e de  $45,4\% \pm 3,9\%$  em relação aos corpos de prova não pré-tensionados.
- 8.8 - Os resultados obtidos com os corpos de prova submetidos à uma pré-tensão de -66,0 MPa, apresentam um aumento da vida em fadiga com a redução da tensão de flexão. Esses resultados concordam com o esperado e mantêm a mesma relação obtida nos casos anteriores.
- 8.9 - A Confiabilidade, medida segundo o índice de vida  $N_{10}$ , mostrou um aumento significativo entre os corpos de prova submetidos ao mesmo nível de tensão alternada, na medida em que se variava a pré-tensão de compressão, desde 0 a -66 MPa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARIN, J., "Mechanical Behavior of Engineering Materials", Prentice-Hall, INC., EUA, 1962.
- [2] Metals Handbook, "Failure Analysis and Prevention", vol. 10, 8<sup>a</sup> ed.
- [3] Norma ASTM E 206.
- [4] STUDEMANN, H., Ensayo de Materiales y Controle de Defectos en la Industria del Metale, Ediciones URMO, 1968.
- [5] DIETER, G.E., "Mechanical Metalurgy", McGraw-Hill inc., New York, EUA, 1961.
- [6] RANSOM, J.T. e MEHL, R.F., "The Statistical Nature of the Fatigue Properties of SAE 4340 Steel Formings", Preprint 87, American Society for Testing Materials, junho, 1952.
- [7] RANSON, J.T. e MEHL, R.F., "The Anisotropy of the Fatigue Properties of SAE 4340 Steel Formings", Preprint 83, American Society for Testing Materials, junho, 1952.
- [8] SINCLAIR, G.M. e DOLAN, T.J., "Effect of Stress Amplitude on Statistical Variability in Fatigue Life of 755-T6 Aluminium Alloy", Transactions of ASME, julho, 1953.
- [9] SOUZA, S.A., Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, 3<sup>a</sup> edição, Editora Edgard Blücher LTDA.
- [10] FINDLEY, W.N., "Experiments in Fatigue under Ranges of Stress in Torsion and Axial Load from Tension to Extreme Compression", Trabalho apresentado no Fifty-seventh Annual Meeting of the Society, pp 836-846, junho, 1954.

- [11] SINES, G., "Failure of Materials under Combined Repeated Stress with Superimposed Static Stresses", National advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 3495.
- [12] FINDLEY, W.N.; MERGER, F.C. e ROSEMBERG, A.H., "The Effect of Range of stress on Fatigue Strength of Notched and Unnotched SAE 4340 Steel in Bending and Torsion", Proceedings, American Society for Testing Materials, vol. 53, 1953.
- [13] NEWARK, N.M.; MOSBERG, R.J.; MUNSE, W.H. e ELLING, R.E., "Fatigue Tests in Axial Compression", Proceedings ASTM, pp 792-810, vol.51, 1951.
- [14] ALMEN, J.O. e BLAK, P.H. "Residual stresses and Fatigue in Metals", McGraw-Hill Book Company, New York, 1963.
- [15] KECECIOGLU, D.B. e GORMIER, D, "Designing a Specified Reliability Directly into a Component", Proceedings of the Third Annual SAE ASME-AIAA Aerospace Reliability and Maintainability Conference, pp 546-565, Washington D.C., 1964.
- [16] KACECIOGLU, D.B.; SMITH, R.E. e FELSTED, E.A., "Distribution Cycles-to-Failure in Simple Fatigue and Associated Reliabilities", Annuals of Assurance Sciences, pp 357-374, 1967.
- [17] KACECIOGLU, D.B.; SMITH, R.E. e FELSTED, E.A., "Distribution Strength in Simple Fatigue and the Associated Reliabilities", Annual of Reliability and Maintainability, pp 659-672, 1970.
- [18] NBR 5462/81
- [19] RODRIGUES, R.S. , Confiabilidade do Produto e Administração da Confiabilidade, Formacon, Mogi das Cruzes, SP.

- [20] NBR 6742, Utilização da distribuição de Weibull para interpretação dos Ensaios de Durabilidade por Fadiga, Janeiro, 1987.
- [21] NBR 9321/86, Cálculo de Estimativas por ponto e limites de Confiança Resultante de Ensaios de Determinação da Confiabilidade de Equipamentos, Abril, 1986.
- [22] SINCLAIR, G.M. E DOLON, T.J., "Effect of Stress Amplitudes on Statistical Variability in Fatigue Life of 755-T6 Aluminium Alloy, Transactions of the ASME, pp 867-870, julho, 1953.
- [23] SHIGLEY, J.E., Elementos de Máquinas. 3<sup>a</sup> edição, LTC Editora S/A, Rio de Janeiro, 1986.
- [24] TIMOSHENKO, S.P., Resistência dos Materiais, Editora Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro, 1969.
- [25] BLAKE, J.C. e KURTZ, H.J., "The Uncertainties of Measuring Fastener Preload", Machine Design, Setembro, 1965.
- [26] DE FRANCISCO, W., Estatística, Editora Atlas S/A, São Paulo, 1982.

## ANEXOS

## A1 - SIMBOLOGIA

$N_{10}$  = Vida em Fadiga com 90% de Cofiabilidade

$S$  = Tensão

$S_{max}$  = Tensão Máxima no Ciclo

$S_{min}$  = Tensão Mínima no Ciclo

$S_r$  = Intervalo de Tensão

$S_m$  = Tensão Média

$N$  = Número de Ciclos até a Falha, Constante do Método da escada

$n$  = Número de Corpos de Provas

$\delta$  = Desvio Padrão

$\bar{S}'$  = Limite de Resistência a Fadiga do Corpo de Prova

$A$  = Constante do Método "escada"

$B$  = Constante do Método "escada"

$S_0$  = Menor Tensão Ensalada

$d$  = Incremento Fixo, Diâmetro de Raiz, Diâmetro Externo

$n_i$  = Número de Corpos de Provas Rompidos a este Nível de Tensão

$M$  = Momento Fletor

C = Distância

I = Momento de Inércia

Z = Módulo de Resistência à Flexão

$d_i$  = Diâmetro Interno

L = Comprimento

A = Área

## A2 - (ÍNDICE DE FIGURAS)

Figura 1.1.a - Montagem Usual

Figura 1.1.b - Montagem com Pré-Tensão

Figura 2.1 - Ciclo de Tensões

Figura 3.1.a - Variação Típica da Porcentagem Acumulada de Falhas para Pontos Alinhados

Figura 3.1.b - Variação Típica da Confiabilidade para Pontos Alinhados

Figura 3.2 - Determinação da porcentagem Acumulada de Falhas para Pontos Desalinhados

Figura 4.1 - Corpo de Prova Normal

Figura 4.2 - Corpo de Prova Pré-Tensionado

Figura 4.3 - Aplicação da Carga no Corpo de Prova

Figura 4.4 - Máquina de Ensaio de Flexão Rotativa

Figura 4.5 - Esquema de Corpo sob Flexão Alternativa

Figura 4.6 - Representação Esquemática da Máquina de Ensaio



## A3 - ÍNDICE DAS TABELAS

- Tabela 4.1 = Propriedades do Material Empregado
- Tabela 4.2 = Níveis de Tensões Utilizados no Ensaio
- Tabela 4.3 = Valores das Leituras das Deformações no Torquímetro
- Tabela 4.4 = Valores Tratados Estatisticamente para Calibração do Torquímetro
- Tabela 4.5 = Valores das Leituras das Deformações no Parafuso Tensor
- Tabela 4.6 = Valores de Cargas e Leituras Tratadas Estatisticamente
- Tabela 4.7 = Valores de X-Y Obtidos no Registrador
- Tabela 4.8 = Valores do Sinal X e Força Y para a Curva de Calibração
- Tabela 5.1 = Valores de Ciclos até a Falha para Ensaio sem Pré-Tensão
- Tabela 5.2 = Tratamento Estatístico dos Ciclos até Falha para Ensaio sem Pré-Tensão
- Tabela 5.3 = Valores dos Ciclos Trabalhados nas Tensões Utilizadas no Método "escada" para Ensaio sem Pré-Tensão
- Tabela 5.4 = Constantes para se Determinar o Limite de Resistência à Fadiga para Ensaio sem Pré-Tensão

- Tabela 6.1 = Valores das Pré-Tensões Utilizadas nos Ensaios
- Tabela 6.2 = Valores dos Ciclos até Falha para Ensaios com Pré-Tensão de -41,3 MPa
- Tabela 6.3 = Tratamento Estatístico dos Ciclos até Falha para Ensaios com Pré-Tensão de -41,3 MPa
- Tabela 6.4 = Valores dos Ciclos Trabalhados nas Tensões Utilizadas no Método "escada" para Ensaio com Pré-Tensão de -41,4 MPa
- Tabela 6.5 = Constantes para se Determinar o Limite de Resistência à fadiga para Ensaio com Pré-Tensão de -41,3MPa
- Tabela 6.6 = Valores dos Ciclos até Falhas para Ensaios com Pré-Tensão de -53,7 MPa
- Tabela 6.7 = Tratamento Estatístico dos Ciclos até Falha para Ensaios com Pré-Tensão de -53,7 MPa
- Tabela 6.8 = Valores dos Ciclos Trabalhados nas Tensões Utilizadas no Método "escada" para Ensaios com Pré-Tensão de -53,7 MPa
- Tabela 6.9 = Constantes para se Determinar o Limite de Resistência à Fadiga para Ensaios com Pré-Tensão de -53,7 MPa
- Tabela 6.10 = Valores dos Ciclos até Falha para Ensaios com Pré-Tensão de -68,0 MPa
- Tabela 6.11 = Tratamento Estatístico dos Ciclos até Falha para Ensaio com Pré-Tensão de -68,0 MPa
- Tabela 6.12 = Valores dos Ciclos Trabalhados nas Tensões

Utilizadas no Método "escada" para Ensaio com  
Pré-Tensão de -66,0 MPa

Tabela 6.13 = Constantes para se Determinar o Limite de  
Resistência à Fadiga para Ensaio com Pré-Tensão  
de -66,0 MPa