

TESTE DE PROVA MECANICA EM FIBRAS OPTICAS

Aluno: Gilberto Mariano Camilo

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Enrique Medrano

Campinas, 10 de Dezembro de 1990.

Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Física da UNICAMP.

Este exemplar corresponde a redação final da Tese defendida pelo aluno Gilberto Mariano Camilo e aprovada pela Comissão Julgadora. Janeiro 15, 1991.



DEDICATORIA

Dedico este trabalho a meus pais, que durante tanto anos e com tantos sacrificios me forneceram todo o apoio para que eu atingisse este objetivo.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, que com compreensão me incentivou a prosseguir, nos momentos em que desistir parecia ser o caminho mais fácil.

A meu orientador, Prof. Medrano, que muito além de orientador sempre confiou em meu trabalho e nunca negou sua pronta ajuda em todos estes anos.

A UNICAMP, uma porta aberta que me permitiu, e esperamos permita sempre a tantos outros, atingir objetivos tão altos.

Ao Centro de Pesquisas da TELEBRAS e aos amigos que lá trabalham.

A Pirelli Brasileira, na pessoa do Eng. Carmine Taralli, que acreditando em minha capacidade e na relevância deste trabalho me forneceu todo o apoio para sua conclusão.

A Paulo Bonafé e Raquel, que com paciência e dedicação realizaram grande parte dos testes necessários.

A todos os meus amigos do Instituto de Física da UNICAMP e do Centro de Engenharia Cabos da Pirelli, pelo apoio que recebi.

RESUMO

A qualidade mecânica das fibras ópticas pode ser influenciada por diversos fatores devido ao material que as compõe, material vítreo. Danos irreversíveis, ou não, podem ocorrer nas diversas etapas do processo de fabricação, outros tantos podem surgir durante a cordagem. Sómente depois de cordadas, colocadas no interior de cabos, é que temos a sua efetiva utilização nos diversos sistemas de telecomunicações.

Com o objetivo de se fornecer uma garantia mecânica, evitando a fratura prematura da fibra, foram criados "testes de prova mecânica" aplicados às fibras após o processo de fabricação. Estes testes implementam uma solicitação mecânica controlada na fibra e basicamente são de dois tipos: aqueles que aplicam a tensão por tração e os que aplicam por flexão. Se a fibra óptica suporta tal solicitação, utilizando-se a Teoria Estatística de Fratura, se pode fornecer uma certa garantia mecânica, assegurando um tempo de vida mínimo de uso.

O objetivo deste trabalho é realizar testes de provas mecânicas utilizando os dois métodos, variando os parâmetros que os controlam, e com base na teoria de fratura avaliar os danos provocados por estes sistemas, e procurar uma relação entre os seus fatores de controle, ou até mesmo uma relação entre eles. Tais relações serão buscadas por meio do "Delineamento Experimental" e da "Análise de Variâncias".

Particularmente trataremos os dados à luz da Função de Distribuição de Probabilidades de Weibull, que descreve os resultados de fratura para materiais frágeis.

INDICE

1 - Introdução	1
2 - Teoria	3
2.1 - Fratura em Sólidos	3
2.2 - Tratamento Estatístico da Fratura Frágil ..	11
2.3 - Crescimento de Trincas	20
2.4 - Teste de Prova Mecânica	30
2.5 - Redução na Probabilidade de Fratura Devido ao Teste de Prova Mecânica	35
2.6 - Delineamento de Experimentos	36
2.6.1 - Análise de Variâncias	37
3 - Experimentos	38

3.1 - Testes Preliminares	38
3.1.1 - Não Uniformidade da Resistência Mecânica de Fibras Ópticas ao Longo de seu Comprimento	39
3.1.2 - Teste de Prova Mecânica por Flexão em Fibras Ópticas	44
3.1.3 - Teste de Prova Mecânica por Tração em Fibras Ópticas	49
3.2 - Delineamento de Experimentos	55
3.2.1 - Delineamento Weibull	59
3.2.1.1 - Resultados "m"	60
3.2.1.2 - Curvas de Interações "m".....	60
3.2.1.3 - Estimativa do Intervalo de Confiança "m".....	61
3.2.1.4 - Resultados "So"	62

3.2.1.5 - Curvas de Interações "So"	63
3.2.1.6 - Estimativa do Intervalo de Confiança "So"	63
3.2.2 - Delineamento Parâmetro de Suscepti- bilidade "n"	64
3.2.2.1 - Resultados "n"	64
3.2.2.2 - Curvas de Interações "n"	65
3.2.2.3 - Estimativa do Intervalo de Confiança "n"	65
3.3 - Análise de Variâncias	66
3.4 - Equação Representativa	68
4 - Discussão dos Resultados	69
4.1 - Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para o Parâmetro "m" de Weibull	69

4.2 - Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para o Parâmetro "So" de Weibull	71
4.3 - Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para o Parâmetro "n"	72
5 - Conclusões	75
6 - Trabalhos Futuros	77
7 - Referências	78
8 - Tabelas	82
9 - Figuras	100

INTRODUÇÃO

Um corpo material quando solicitado mecanicamente responde com deformações elásticas e plásticas. A deformação elástica é resultado da translação e rotação dos átomos sem a quebra de suas ligações, ao passo que a plástica é o produto de um rearranjo dos átomos, com o rompimento de ligações antigas e formação de novas. Devido à composição química das fibras ópticas e às condições ambientais a que estão submetidas, comportam-se como um sólido elástico, definindo-se neste caso como um material "frágil".

Já em 1920 Griffith [1] afirmava que a ruptura de materiais frágeis pode ser explicada pela existência de trincas em sua estrutura. Propôs ainda que nestes materiais deve existir uma concentração de tensões nas vizinhanças destas trincas, levando à ruptura mesmo que estas tensões sejam bem inferiores àquelas descritas nos cálculos de coesão teórica.

Como as trincas distribuem-se pelo material de forma completamente aleatória, um enfoque estatístico na ruptura destes materiais foi inevitável. Em 1939 Weibull [2] propôs uma função de distribuição de probabilidades que descrevia os resultados dos ensaios de ruptura em materiais frágeis. O modelo seguido por Weibull foi o do "anel mais fraco", ou seja, uma corrente é tão forte quanto o mais fraco de seus anéis.

Uma última consideração fundamental feita para explicar a falha catastrófica nos materiais frágeis foi fornecida por Wiederhorn [3]. Com base em um modelo de crescimento de trincas a partir de ataque químico e presença de tensão, mediu a velocidade do crescimento em função de um fator de intensidade de tensão.

Será com base nestes princípios, juntamente com algumas ferramentas estatísticas, que desenvolveremos a metodologia para descrever e prever o comportamento mecânico de fibras ópticas submetidas aos testes de provas mecânicas.

2. TEORIA

2.1 - Fratura em Sólidos

S. W. Freiman em uma recente revisão [4] descreveu a análise da fratura "pura" em um sólido, ou seja, aquela que se origina do rompimento das ligações atômicas. Analisando as forças de atração e repulsão, tem-se que a máxima tensão para o rompimento de uma ligação atinge um máximo e decresce logo a seguir (figura 1).

Para a tensão crítica teórica σ_c , aproxima-se a figura 1 a uma senóide de comprimento de onda λ :

$$\sigma = \sigma_c \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (1)$$

Onde x é o deslocamento do átomo a partir da posição de equilíbrio.

Para pequenos deslocamentos, $x \approx \sin x$:

$$\sigma = \sigma_c \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2)$$

Para materiais frágeis, completamente elásticos:

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

Onde E é o módulo de elasticidade, ϵ o alongamento do material, no nosso caso igual a x/a_0 , e a_0 a posição de equilíbrio.

Substituindo (3) em (2):

$$\sigma_c = \lambda \frac{E}{2\pi a_0} \quad (4)$$

Duas novas superfícies são formadas cada vez que uma cadeia é quebrada, e a energia superficial é fornecida pela metade da área abaixo da curva de tensão versus deslocamento na figura 1:

$$\gamma_s = \frac{1}{2} \int_0^{\left(\frac{\lambda}{2}\right)} \sigma_c \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} dx = \lambda \frac{\sigma_c}{(2\pi)} \quad (5)$$

Substituindo este λ em (4):

$$\sigma_c = \left(E \frac{\gamma_s}{a_0} \right)^{(1/2)} \quad (6)$$

Inglis [5] estudando trincas elípticas provocadas em placas planas, demonstrou que a concentração de tensão nas vizinhanças da elipse (figura 2) é uma relação entre a tensão aplicada e o comprimento de seus eixos:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{c}{b} \right) \quad (7)$$

Quando se trata de uma elipse bastante estreita ($b \ll c$) se pode tomar o raio de curvatura ρ como b^2/c . Então (7) fica:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right) \approx 2\sigma \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (8)$$

Igualando-se (6) a (8) obtemos a máxima tensão suportada por um material que contenha uma trinca elíptica:

$$\sigma \approx \left(E \gamma_s \frac{\rho}{(4a_0 c)} \right)^{(1/2)} \quad (9)$$

Aqui cabe duas observações:

- a primeira é no que diz respeito à equação (6), para os mater-

iais vítreos onde temos com boa aproximação $E \approx 70 \text{ GPa}$, $\alpha_0 \approx 30 \text{ nm}$ e $\gamma_s \approx 5 \text{ J/m}^2$, obtém-se um valor bastante próximo de $E/10$ para a tensão de fratura.

Pela prática se sabe que raramente se obtém tensões desta ordem, na maioria dos casos varia de 10 a 100 vezes abaixo deste valor.

- a segunda é que se substituimos os valores das constantes dos materiais vítreos em (9), explica-se esta redução.

A motivação para o trabalho de Griffith [1] foi a verificação experimental de que a resistência de um sólido qualquer era grandemente influenciada pelo tratamento superficial do material: quanto mais cuidadoso o tratamento maior a resistência do material.

Com base em vários ensaios de ruptura em diversos materiais, e com base nos trabalhos de Inglis, mostrou que "uma trinca se propagará quando a diminuição da energia elástica de deformação for pelo menos igual à energia necessária para se criar uma nova superfície".

Partindo do modelo de Inglis encontra-se a energia de deformação elástica por unidade de espessura da placa:

$$U_E = -\pi c^2 \frac{\sigma^2}{E} \quad (10)$$

Onde σ é a tensão de tração normal à trinca e $2c$ o semieixo maior da trinca elíptica.

A energia liberada no processo de crescimento explica o sinal negativo da equação (10).

A energia de superfície devido à fissura é:

$$U_s = 4c\gamma_s \quad (11)$$

A energia total U:

$$U = U_E + U_s = -\pi c^2 \frac{\sigma^2}{E} + 4c\gamma_s \quad (12)$$

No equilíbrio:

$$\frac{dU}{dc} = 0 \quad (13)$$

ou

$$-2\pi c \frac{\sigma^2}{E} + 4\gamma_s = 0 \quad (14)$$

Então,

$$\sigma = \left(2E \frac{Y_c}{\pi c} \right)^{(1/2)} \quad (15)$$

No modelo de Inglis a trinca se propaga quando a tensão em sua extremidade atinge um valor crítico, e tanto o modelo de Griffith quanto o de Inglis estabelecem que a tensão de propagação da trinca é inversamente proporcional à raiz quadrada do comprimento da fissura, concluindo que um aumento de 4 vezes no tamanho da fissura diminui pela metade a tensão de ruptura.

Alguns anos mais tarde, Irwin [6] mostrou que as tensões nas vizinhanças de uma fissura dependem da tensão na placa e da raiz quadrada da metade do comprimento da trinca, chamando esta relação de "Fator de Intensidade de Tensão K_I ":

$$K_I = \sigma Y \sqrt{x} \quad (16)$$

Esta equação é válida para uma trinca elíptica em uma placa infinitamente larga, que é uma boa aproximação para as pequenas trincas nos materiais vítreos. O valor de Y no caso de trincas elípticas é $\sqrt{\pi}$ [7].

Utilizando-se de placas de vidros, R. J. Charles [8], Evans e Wiederhorn [9,10] estudaram a relação entre a conhecida curva de velocidade de crescimento de trinca versus fator de intensidade de tensão

K_I , com o fenômeno da corrosão causada por elementos adversos presentes no meio ambiente. A relação entre K_I e V para qualquer sistema depende da concentração destes elementos corrosivos no meio ambiente e também da temperatura. Por outro lado, independe do comprimento da trinca e de sua geometria.

Uma curva típica é mostrada na figura 3.

Se pode perceber três regiões bem distintas: - região I na qual a taxa de reação química de corrosão na extremidade da trinca controla o seu crescimento, nesta região em geral $V = \exp(\beta K_I)$, onde β é uma constante. A expressão largamente utilizada hoje é aquela proposta por Wiederhorn, que muito se aproxima da anterior:

$$V = A(K_I)^n \quad (17)$$

Na região II, onde a velocidade de crescimento é constante, se considera que o movimento de crescimento é controlado pela difusão dos elementos corrosivos.

Na região III a trinca cresce rapidamente com o aumento de K_I . Nesta região K_I é bastante próximo de K_{Ic} , o fator de intensidade de tensão crítico de ruptura.

Se pode afirmar com bastante segurança que a fratura se inicia no final da região II, onde se atinge K_{Ic} e a trinca se propaga catastróficamente.

Utilizaremos a aproximação de que toda a curva de velocidade versus fator de intensidade de tensão pode ser descrita pela equação (17), ou seja, consideraremos que a principal porção desta curva pertence ao tipo I de crescimento, com as regiões II e III bastante pequenas.

No caso da sílica pura o principal agente corrosivo é a água, sob a forma $H(+)$ + $OH(-)$. Nas figuras 4 e 5 está ilustrado o esquema de ataque químico, mecanismo de crescimento de trinca aceito largamente na literatura internacional.

2.2 - Tratamento Estatístico da Fratura Frágil

Se efetuamos um grande número de ensaios mecânicos em corpos de prova similarmente fabricados, sob os quais seja aplicado um sistema de forças P , aumentando-se P de zero até a ruptura do corpo, obtém-se um sistema $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N$ de tensões. Estas tensões são as máximas suportadas por cada um dos N corpos de prova, e elas permitem a obtenção (experimentalmente) da probabilidade de ruptura de uma peça similar submetida a uma tensão máxima σ . Esta probabilidade é:

$$F(\sigma) = \frac{n}{N} \quad (18)$$

Onde n é o número de peças que se romperam a uma tensão menor ou igual a σ .

N é o número total de peças.

$F(\sigma)$ é a probabilidade acumulativa de ruptura.

Como é óbvio,

$$F(\infty) = 1 \quad \text{e} \quad F(0) = 0 \quad (19)$$

Ou seja, nenhuma peça se rompe a uma tensão nula e todas acabam por se romper a uma tensão suficientemente alta. Deixaremos de lado neste momento a fadiga estática em materiais frágeis, que trata do tempo necessário para a fratura quando a tensão é mantida constante sobre a peça.

Se todos os corpos de prova foram similarmente construídos, e além disso, se o material tem as mesmas propriedades em qualquer ponto (isotrópico), deve então verificar-se:

$$\bar{F}(V_1 \cup V_2) = \bar{F}(V_1) \cdot \bar{F}(V_2) \quad (20)$$

com

$$(V_1 \cap V_2) = \emptyset \quad (21)$$

e

$$(V_1 \cup V_2) = V \quad (22)$$

\bar{F} é a probabilidade de que não se rompa (não F), V_1 e V_2 parcelas quaisquer de V .

As expressões (20), (21) e (22) definem uma função com a seguinte propriedade:

$$\bar{F}(0) = 1 - F(0) = 1 \quad (23)$$

visto que

$$\bar{F}(V + 0) = \bar{F}(V) \cdot \bar{F}(0) = \bar{F}(V) \quad (24)$$

Para um pequeno incremento de volume obtemos:

$$\bar{F}(V + \Delta V) = \bar{F}(V) + \bar{F}'(V) \cdot \Delta V \quad (25)$$

ou

$$\bar{F}(V + \Delta V) = \bar{F}(V) \cdot \bar{F}(\Delta V) \quad (26)$$

$\bar{F}(V)$ em torno da origem ($V=0$), nos fornece:

$$\bar{F}(\Delta V) = \bar{F}(0 + \Delta V) = \bar{F}(0) + \bar{F}'(0) \cdot \Delta V = 1 + \bar{F}'(0) \cdot \Delta V \quad (27)$$

Utilizando (25), (26) e (27) :

$$\bar{F}(V) + \bar{F}'(V) \cdot \Delta V = \bar{F}(V) [1 + \bar{F}'(0) \cdot \Delta V] \quad (28)$$

ou

$$\bar{F}'(V) = \bar{F}(V) \cdot \bar{F}'(0) \quad (29)$$

$$\frac{\bar{F}'(V)}{\bar{F}(V)} = \frac{\bar{F}'(0)}{\bar{F}(0)} \quad (30)$$

O significado imediato desta expressão é que a quantidade de peças que não se rompem ao aumentar-se o volume é constante. Mas, também podemos afirmar que esta constante deve ser função de σ e negativa, pois quanto maior uma peça mais fácil ela se rompe, já que é mais provável que possua uma trinca que leve à ruptura. Logo,

$$\frac{\bar{F}'(V)}{\bar{F}(V)} = \frac{-\phi(\sigma)}{V_0} \quad (31)$$

V_0 é a unidade de volume, preservando a dimensionalidade $\phi(\sigma)/V_0$ é a esperança de sobrevivência a um nível σ de tensão, por unidade de volume.

Integrando (31) em volume:

$$\ln \bar{F}(V) = -\phi(\sigma) \frac{V}{V_0} \quad (32)$$

ou

$$\bar{F}(V) = \exp \left[-\phi(\sigma) \left(\frac{V}{V_0} \right) \right] \quad (33)$$

ou

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\phi(\sigma) \left(\frac{V}{V_0} \right) \right] \quad (34)$$

Em seu trabalho de 1939, Weibull [2] propôs a seguinte função $\phi(\sigma)$:

$$\phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_l)}{\sigma_0}, \quad \text{para } \sigma > \sigma_l$$

e

$$0, \quad \text{para } \sigma < \sigma_l \quad (35)$$

Onde σ_l é uma tensão limite inferior, tensão abaixo da qual não se observa ruptura, m é uma medida da dispersão dos dados e σ_0 uma constante de localização da curva.

Portanto,

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_l}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (36)$$

É comum considerar $\sigma_l = 0$, admitindo a possibilidade de se encontrar um ponto fraco na amostra. Também, ao se considerar amostras similares dimensionalmente, pode-se eliminar o volume da expressão (36). Logo,

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (37)$$

A vantagem desta forma para a função de probabilidade de ruptura de Weibull, é que se a representarmos em um gráfico bilogarítmico, podemos estimar por quadrados mínimos lineares os parâmetros σ_0 e m .

As outras formas da função de probabilidade de Weibull também são passíveis de tratamentos estatísticos com o objetivo de se estimar seus parâmetros [11,12 e 13], mas exigem cálculos bem mais trabalhosos.

Aplicando a (37) o logarítmo natural duas vezes obtemos:

$$\ln[1 - F(\sigma)] = -\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (38)$$

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1 - F(\sigma)}\right]\right\} = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (39)$$

que é a forma $Y = mX + C$, com

$$Y = \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1 - F(\sigma)}\right]\right\} \quad (40)$$

$$X = \ln \sigma \quad (41)$$

e

$$C = -m \ln \sigma_0 \quad (42)$$

Para plotarmos Y contra X ainda é necessário conhecermos a forma de $F(\sigma)$, "Função de Probabilidades de Posições".

Podemos ordenar os diversos valores de tensões obtidos nos ensaios: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_N$. Conseqüentemente podemos ordenar também $F(\sigma_i)$, a cada valor associamos uma "probabilidade ordenadora de dados", indicando a probabilidade daquele dado se posicionar no espaço amostral.

Kapur e Lamberson [14] fizeram um resumo da teoria que fornece as várias funções de probabilidade de posições associadas a $F(\sigma_i)$. O procedimento para a determinação da melhor função consiste em dividir o espaço amostral em três regiões mutuamente exclusivas, com probabilidade constante de uma dada observação cair em uma delas. Por meio da distribuição multinomial é possível determinar-se uma distribuição de posições das observações, que é a conhecida "Distribuição Beta". O único argumento que se utiliza é o da diferenciabilidade da função acumulativa que se deseja estudar, esta distribuição obtida se aplicará tanto à Weibeliana quanto a qualquer outra função de probabilidade contínua.

Avaliando o valor médio da Função Beta encontra-se $1/(N+1)$, onde "i" é a ordem da observação e "N" o número total de observações. A mediana que se obtém é $(i-0.3)/(N+0.4)$, sendo este valor uma aproximação para a integral na Função Beta Incompleta. Ambas são utilizadas, dependendo ser a média ou a mediana a escolhida como valor representativo das observações. Mas, em distribuições altamente assimétricas, a mediana representa melhor as observações, geralmente a média fornece resultados subestimados.

Kimball [15], mais recentemente Bergman [16], realizaram estudos que indicam para o nosso tamanho amostral (N entre 30 e 50) a seguinte função de distribuição de posições como sendo a melhor:

$$F(\sigma_i) = \frac{i - \left(\frac{1}{2}\right)}{N} \quad (43)$$

Onde N é o número total de ensaios realizados e "i" o índice ordenador destes ensaios.

Na figura 6 podemos observar um ensaio de ruptura em fibras ópticas, foram rompidas 30 amostras for ensaios de tração, plotados e estimados os parâmetros por quadrados mínimos lineares. Os resultados dos parâmetros estão logo abaixo.

2.3 - Crescimento de Trincas

Uma vez compreendido o fenômeno da fratura frágil, seu caráter estatístico e sua variabilidade, passaremos agora a descrever a parte da Teoria de Fratura Frágil que relaciona a quebra com os mecanismos de crescimento de defeitos.

Como já mencionado anteriormente, o estudo do mecanismo de crescimento de trincas se iniciou com R. J. Charles [8], e mais recentemente Evans e Wiederhorn [3,9] investigaram os materiais cerâmicos à luz dos mecanismos de corrosão.

Inicialmente analisaremos o caso de um corpo de prova submetido a uma taxa de carregamento constante $\dot{\sigma}$, como no caso de uma fibra submetida a um ensaio de tração. Neste caso, uma trinca de tamanho inicial x_1 crescerá até atingir o valor crítico x_c da fratura. Utilizando (17) e (18) e sabendo que

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (44)$$

Chegamos na seguinte equação diferencial:

$$\frac{dx}{dt} = A\sigma^n Y^n x^{\frac{n}{2}} \quad (45)$$

O tempo de crescimento (t_c) de x_i até x_c será:

$$\int_{x_i}^{x_c} x^{-\frac{n}{2}} dx = AY^n \int_0^{t_c} \sigma^n dt \quad (46)$$

Já que a tensão é função do tempo para o teste de tração.

Quando $\dot{\sigma}$ é constante, σ é obtido de:

$$\sigma = \dot{\sigma} t \quad (47)$$

Então, (46) fica:

$$\int_{x_i}^{x_c} x^{-\frac{n}{2}} dx = AY^n \int_0^{\sigma_r} \frac{\sigma^n}{\dot{\sigma}} d\sigma \quad (48)$$

Onde σ_r é o valor da tensão no momento da ruptura.

O tamanho crítico da trinca x_c para a ruptura se pode escrever a partir da equação (16):

$$x_c = \left(\frac{K_{lc}}{\sigma_B Y} \right)^2 \quad (49)$$

Integrando (48) e substituindo x_c :

$$\frac{x_c^{1-\frac{n}{2}}}{1-\frac{n}{2}} - \frac{x_i^{1-\frac{n}{2}}}{1-\frac{n}{2}} = \frac{AY^n}{\sigma} \cdot \frac{\sigma_B^{n+1}}{n+1} \quad (50)$$

Então,

$$\left(\frac{K_{lc}}{\sigma_B Y} \right)^{2-n} - x_i^{1-\frac{n}{2}} = \frac{(2-n)AY^n}{2\sigma} \cdot \frac{\sigma_B^{n+1}}{(n+1)} \quad (51)$$

ou

$$\sigma_B^{n+1} = \frac{2\sigma(n+1)}{(n-2)AY^n} \cdot \left[x_i^{1-\frac{n}{2}} - \left(\frac{K_{lc}}{\sigma_B Y} \right)^{2-n} \right] \quad (52)$$

Como o valor de "n" é da ordem de 20 para fibras ópticas, o segundo termo de (52) é muito menor que o primeiro, portanto:

$$\sigma_B^{n+1} = \frac{2\dot{\sigma}x_i^{\frac{2-n}{2}}(n+1)}{(n-2)AY^n} \quad (53)$$

Para o caso de uma tensão constante σ , aplicada por um tempo t_s , partindo de (46):

$$\int_{x_i}^{x_c} x^{-\frac{n}{2}} dx = AY^n \int_0^{t_s} \sigma^n dt \quad (54)$$

Logo,

$$\frac{x_c^{1-\frac{n}{2}}}{1-\frac{n}{2}} - \frac{x_i^{1-\frac{n}{2}}}{1-\frac{n}{2}} = AY^n \sigma_s^n t_s \quad (55)$$

Entrando com K_{lc} :

$$\left(\frac{K_{lc}}{\sigma_B Y} \right)^{2-n} - x_i^{1-\frac{n}{2}} = \frac{2-n}{2} AY^n \sigma_s^n t_s \quad (56)$$

ou

$$\sigma_s^n t_s = \frac{2}{(n-2)AY^n} \left[x_t^{1-\frac{n}{2}} - \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_B Y} \right)^{2-n} \right] \quad (57)$$

Pela mesma consideração, devido à ordem de grandeza de "n", temos finalmente:

$$\sigma_s^n t_s = \frac{2}{n-2} \cdot \frac{x_t^{\frac{2-n}{2}}}{AY^n} \quad (58)$$

Esta equação nos mostra claramente que o tempo de sobrevivência na fadiga estática é inversamente proporcional a σ_s^n .

Outras formas bastante conhecidas das equações (53) e (58), leva em consideração a realização dos ensaios em "meio inerte", quando a condição do teste não permite o ataque químico que leva a um crescimento adicional da trinca, além do causado pela ação da tensão rompendo as ligações químicas do material.

No caso de fibras ópticas temos duas condições para ensaios sem ataque químico: uma delas é mergulhar a fibra, durante o ensaio de tração, em Nitrogênio Líquido; a outra é realizar o ensaio a altas taxas de carregamento, diminuindo o tempo que ocorre a migração de humidade seguida de corrosão. O primeiro método é bastante caro e trabalhoso, sendo mais viável o segundo método.

No caso do ensaio em meio inerte podemos considerar:

$$K_{li} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}} K_{lc} \quad (59)$$

σ_{ic} a tensão crítica em meio inerte.

Ou seja, o fator de intensidade de tensão inicial está relacionado ao valor crítico pela redução de tensão devido ao ataque químico, expresso por σ_i/σ_{ic} .

Como já visto, para uma trinca inicial x_i , temos:

$$x_i = \left(\frac{K_i}{\sigma_i Y} \right)^2 \quad (60)$$

Substituindo (59) em (60):

$$x_i = \left(\frac{K_{lc}}{\sigma_{ic} Y} \right)^{2-n} \quad (61)$$

Substituindo em (58):

$$t_s = \sigma_s^{-n} \sigma_{ic}^{n-2} \frac{2}{n-2} \frac{K_{lc}^{2-n}}{Y^2 A} \quad (62)$$

Chamando

$$B = \frac{2}{n-2} \frac{K_{lc}^{2-n}}{AY^2} \quad (63)$$

Temos finalmente:

$$t_s = B \sigma_s^{-n} \sigma_{lc}^{n-2} \quad (64)$$

e para (53):

$$\sigma_B^{n+1} = B(n+1) \sigma_{lc}^{n-2} \dot{\sigma} \quad (65)$$

Portanto, (64) e (65) são as relações entre a tensão de quebra em meio inerte σ_{lc} com a tensão estática σ_s e com a tensão de quebra σ_B em meio não inerte.

Aqui faremos uma breve consideração sobre o parâmetro "n", conhecido como "Parâmetro de Susceptibilidade a Fadiga", ou simplesmente "parâmetro de fadiga". Devido à sua importância no estudo já visto, veremos brevemente como avaliar este parâmetro.

O valor do parâmetro "n" está diretamente ligado ao grau de ataque químico presente durante o ensaio, ou durante o tempo de vida do material. Como já visto anteriormente, no caso de fibras ópticas, este parâmetro está ligado diretamente à quantidade de humidade presente.

Uma maneira bastante prática de se calcular este parâmetro para uma fibra óptica consiste em:

- linearizando (65):

$$\ln(\sigma_B) = \frac{\ln(B) + \ln(n+1) + (n-2)\ln(\sigma_{tc}) + \ln(\dot{\sigma})}{(n+1)} \quad (66)$$

Uma outra forma para (66):

$$\ln(\sigma_B) = \frac{\ln(B) + \ln(n+1) + (n-2)\ln(\sigma_{tc})}{(n+1)} + \frac{\ln(\dot{\sigma})}{(n+1)} \quad (67)$$

(67) é da forma $Y = mX + C$, onde

$$Y = \ln(\sigma_B) \quad \text{e} \quad X = \ln(\dot{\sigma}) \quad (68)$$

o coeficiente angular

$$m = \frac{1}{(n+1)} \quad (69)$$

a constante

$$C = \ln(B) + \ln(n+1) + (n-2)\ln(\sigma_{lc}) \quad (70)$$

Portanto, realizando séries de testes de ruptura a várias taxas de carregamento $\dot{\sigma}$, obteremos os valores σ_p . Se plotamos $\ln(\sigma_p)$ versus $\ln(\dot{\sigma})$, e aplicamos um método de mínimos quadrados lineares, podemos obter "n" por meio do coeficiente angular da reta de regressão. Inclusive, se realizamos paralelamente ensaios em meio inerte obteremos σ_{lc} , que aplicado em (70) nos fornecerá "B", outro parâmetro importante na teoria de crescimento de trincas.

Na figura 7, obtida de [17], vemos uma aplicação prática do método.

Observamos que para um valor seguro de "n" são aconselháveis vários ensaios para cada taxa de carregamento, e várias taxas devem ser realizadas, com variações de até 4 ordens de grandeza entre a menor e a maior taxa.

Recentemente utilizamos esta metodologia para o cálculo do parâmetro de fadiga para distintas fibras [17]. Nestas provas encontramos valores de $n = 14 \pm 2$ para fibras recobertas em silicone e $n = 25 \pm 2$ para fibras recobertas em acrilato.

Uma boa referência para valores obtidos na literatura internacional é o trabalho de Ritter [18].

2.4 - Teste de Prova Mecânica

O teste de prova mecânica é uma técnica utilizada com o objetivo de selecionar de uma grande quantidade de peças, ou de um material qualquer produzido, aquela porção que, com uma margem de segurança conhecida, suportará níveis de exigências especificadas. No caso de fibras ópticas estas exigências se referem ao nível de tensão mínima abaixo da qual a fibra não se rompe, e ao tempo de vida da fibra sob determinadas condições de tensão aplicada.

Outro ponto importante para a realização desta seleção de produtos, é a necessidade de se medir o dano provocado pelo teste de prova durante a seleção.

A teoria de fratura nos fornece meios para conferir este dano e prever o tempo de uso do produto submetido ao teste de prova.

Os primeiros estudos efetuados por Evans e Wiederhorn [10] trataram a questão de forma bem geral, aplicando-se a qualquer material cerâmico (frágil).

Nos últimos anos a teoria foi aplicada especificamente a fibras ópticas [19], surgindo então alguns novos parâmetros importantes para se qualificar o teste de prova, como é o caso do "comprimento de sobrevivência", do qual não entraremos em maiores detalhes.

Ainda com relação às fibras ópticas, devemos mencionar que foram desenvolvidos vários equipamentos para a implementação do teste. Na parte experimental do trabalho entraremos em detalhes sobre os diversos modelos existentes, e as implicações práticas de seu uso.

Analizemos agora a teoria de fratura do teste de prova mecânica aplicado a fibras ópticas.

Durante o teste de prova a fibra é submetida a uma tensão de prova σ_p durante um tempo t_p . De acordo com a teoria já vista, a trinca cresce de um certo tamanho neste período. Então, é muito importante medir esta redução de resistência e determinar as consequências que acarreta no tempo de vida da fibra.

A relação entre o comprimento da trinca x_i e a resistência a tração, a uma tensão constante σ , é expresso por (57) na forma:

$$\sigma_p^n t_p = \frac{2}{n-2} \frac{1}{AY^n} \left[x_i^{1-\frac{n}{2}} - x_p^{1-\frac{n}{2}} \right] \quad (71)$$

Já a tensão de quebra σ_{B1} , após o teste de prova, de acordo com (52), fica:

$$\frac{\sigma_{B1}^{n+1}}{\sigma(n+1)} = \frac{2}{n-2} \frac{1}{AY^n} \left[x_p^{1-\frac{n}{2}} - \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{B1} Y} \right)^{2-n} \right] \quad (72)$$

Aqui foi acrescentado o subíndice 1 a σ , para diferenciar de σ , sem o teste de prova.

Eliminando os termos de tamanho de trinca, se obtém a seguinte relação das equações (52), (71) e (72):

$$\sigma_{B1}^{n+1} = \sigma_B^{n+1} - \sigma_p^n t_p [\dot{\sigma}(n+1)] \quad (73)$$

Se ressaltamos sómente a fadiga estática na equação (71), e utilizamos o raciocínio análogo, obtemos a expressão para a redução da fadiga estática após o teste de prova:

$$\sigma_{s1}^n t_{s1} = \sigma_s^n t_s - \sigma_p^n t_p \quad (74)$$

Para ilustrar analisemos as expressões para o tempo mínimo de sobrevivência após o teste de prova, e para a redução de resistência, propostas por Evans e Wiederhorn:

- utilizando (44) e (16), onde σ_s é a tensão de serviço, o tempo para a fratura é:

$$t = \frac{2}{\sigma_s^2 Y^2} \int_{K_{II}}^{K_{Ic}} \frac{K_I}{V} dK_I \quad (75)$$

Então,

$$t = \frac{2}{n-2} \frac{1}{A\sigma_s^2 Y^2} (K_{II}^{2-n} - K_{Ic}^{2-n}) \quad (76)$$

Como $9 < n < 50$ para materiais cerâmicos [20], $K_{Ic}^{2-n} \ll K_{II}^{2-n}$, logo:

$$t \approx \frac{2}{n-2} \frac{1}{AY^2} \frac{K_{II}^{2-n}}{\sigma_s^2} \quad (77)$$

Para o material sobrevivente ao teste de prova garante-se que o fator de intensidade de tensão na extremidade da pior trinca não excede K_{Ic} , senão teria ocorrido uma quebra. Assim,

$$\frac{K_{II}}{\sigma_s} = \frac{K_{I,ip}}{\sigma_p} < \frac{K_{Ic}}{\sigma_p} \quad (78)$$

$K_{I,ip}$ é o fator de intensidade de tensão no nível do teste de prova.

Substituindo $K_{II} < (\sigma_s/\sigma_p)K_{Ic}$ na equação (77), o tempo mínimo de sobrevivência para o material sobrevivente é:

$$t_{\min} = \sigma_p^{n-2} \sigma_s^{-n} B \quad (79)$$

Onde B é dado por (63).

A expressão (79) é similar a (64), uma vez aproxima-se σ_c por σ_p para a trinca no limite.

Para a redução de resistência devido ao teste de prova, Evans e Wiederhorn chegaram a:

$$\left(\frac{\sigma_{B1}}{\sigma_B} \right)^{n-2} = 1 - \left(\frac{\sigma_p^*}{\sigma_B} \right)^{n-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_p^*} \right)^{n-2} \right] \quad (80)$$

Onde σ_p^* é a tensão de prova equivalente que seria obtida em um ensaio em atmosfera inerte.

2.5 - Redução na Probabilidade de Fratura Devido ao Teste de Prova Mecânica

É comum se estudar as alterações na resistência mecânica de um material frágil quando submetido a um ensaio mecânico, pelas transformações ocorridas nas curvas de probabilidade de Weibull obtidas antes e após o ensaio, que mostram uma truncagem da curva no nível de tensão do teste de prova, já que nenhum ponto surge a esquerda deste nível, pois ocorreria uma quebra durante o teste.

Na figura 8 ilustramos com um estudo deste tipo, onde se percebe níveis de testes de provas com as consequentes truncagens da curva de Weibull original.

É nossa proposta que uma outra forma de se estudar o dano mecânico provocado pelo teste de prova é medir a mudança no parâmetro de fadiga "n", antes e após o teste. Na literatura este parâmetro é considerado constante, mas recentes resultados de nosso grupo [21,22] indicam outro comportamento. Além disso, consideramos que aprofundamos o estudo, porque este parâmetro espelha não só alterações nas trincas do material como também o dano no revestimento primário da fibra.

Utilizaremos estes métodos para tentar comparar os danos mecânicos nos distintos tipos de teste de prova.

2.6 - Delineamento de Experimentos

Os parâmetros que temos controle nos testes de provas mecânicas são: a velocidade de passagem da fibra pelo sistema e o nível de tensão aplicado.

Por outro lado, dependendo do tipo de teste de prova, tração ou flexão, os danos mecânicos se supõe distintos. Devemos portanto alterar estes parâmetros nos dois sistemas e tentar avaliar a perda de resistência em cada caso. Mas, que variações devemos aplicar? que velocidades e que níveis de tensões aplicar de forma a obter uma condição similar de dano para os dois sistemas?

Exatamente neste ponto podemos utilizar a teoria do "Delineamento de Experimentos" e da "Análise de Variâncias".

O delineamento experimental, vide referências para a Análise de Variâncias, está diretamente ligado ao aprimoramento e a um profundo conhecimento do produto final, utilizando como recursos uma melhor combinação dos níveis dos parâmetros que determinam uma otimização deste produto.

São definidas três fases distintas em um projeto como este: o projeto do sistema, a variação dos parâmetros de controle e o estudo das características do produto final.

No nosso caso, a primeira etapa é a construção dos sistemas de provas mecânicas, a segunda a variabilidade dos parâmetros de controle

(velocidade de passagem e nível de tensão durante o teste), e a terceira o emprego da teoria de fratura frágil, juntamente com a análise de variâncias estatística.

2.6.1 - Análise de Variâncias Estatística

A análise de variâncias [23,24] é um dos mais poderosos recursos na análise estatística, basicamente consiste na classificação de resultados estatísticos de testes efetuados em sistemas distintos, que possuem objetivos comum.

Como não é nosso objetivo demonstrar todo o procedimento para a análise de variâncias, reservamos a parte experimental para a sua descrição, ao mesmo tempo que aplicamos a análise a nossos resultados.

3 - Experimentos

3.1 - Testes Preliminares

Com o objetivo de se entender um pouco melhor os dois tipos de prova mecânica em fibras ópticas, e de se conhecer até que ponto a teoria da mecânica da fratura descreve realisticamente os ensaios realizados nestes sistemas, quando se varia os parâmetros de teste, foram projetados e desenvolvidos os sistemas e realizadas séries de testes. Passaremos a descrever o desenvolvimento dos sistemas e os respectivos testes realizados, com uma breve interrupção para analisarmos o caso da não homogeneidade da resistência mecânica ao longo do comprimento de uma fibra óptica.

3.1.1 - Não Uniformidade da Resistência Mecânica de uma Fibra Óptica ao Longo de seu Comprimento

Quando iniciamos os primeiros ensaios com o teste de prova de roletes, percebemos uma tendência de resultados para os parâmetros de Weibull que nos pareceram bastante incomuns. Quando as amostras eram retiradas de uma mesma fibra, mas em porções localizadas em diferentes regiões de seu comprimento, os parâmetros apresentavam valores sistematicamente maiores ou menores, dependendo de onde haviam sido retirados. Baseados nesta informação, resolvemos antes da continuação dos trabalhos, investigar a resistência mecânica de uma fibra ao longo de todo o seu comprimento, e caso fosse detectada alguma diferença nestas resistências, deveríamos adotar um procedimento aleatório para a retirada de amostras a serem submetidas aos testes de prova.

Com o objetivo de estudar a uniformidade da resistência mecânica ao longo da fibra, ensaiou-se toda a extensão de uma fibra óptica. Seu comprimento total era de 1550 metros, implicando na realização de 1023 ensaios de tração em amostras de aproximadamente 1.5 metros.

O sistema de agarramento das amostras, que é um ponto crítico nos ensaios de tração com esse material, foi o de polias. Comprimento livre resultante nos ensaios foi de 0.5 metros. Foi tomado o cuidado de se indexar os ensaios para que no final se pudesse recuperar a posição de cada um deles ao longo da fibra.

De posse de todos os valores de tensão de ruptura, e aplicando-se o modelo de Weibull, levantou-se um diagrama para a totalidade dos dados, ilustrado na figura 9.

Para estudarmos o comportamento da resistência mecânica ao longo da fibra, foram levantados 10 diagramas com 100 dados cada um, aplicando-se o mesmo modelo anterior e respeitando o ordenamento dos ensaios. Destes resultados foi observado que o valor do parâmetro de Weibull (m) não se mantém constante ao longo da fibra, mais especificamente, ele são menores na região da extremidade relacionada ao início do processo de fusão, do que os da extremidade oposta.

Para se visualizar melhor os diagramas obtidos, levantamos um histograma que representa o comportamento de " m " ao longo de toda a fibra (figura 10).

Também, constatamos dois tipos principais de curvas, que podem ser observadas nas figuras 11 e 12. As curvas do tipo mostrada na figura 11 foram encontradas nos primeiros 500 dados obtidos, todas as curvas restantes se enquadram no tipo exemplificado pela figura 12.

Observando os resultados já mencionados constatamos que para a totalidade dos dados não podemos extrapolar comprimentos utilizando a equação (37), porque não se tem uma única distribuição de Weibull. Pelo contrário, estes dados indicam a presença de duas distribuições deste tipo (distribuição bimodal). Esta segunda distribuição adviria certamente dos primeiros 500 dados, já que nos 500 restantes aparece uma única distribuição. Portanto, se houvéssemos ensaiado amostras de

longo comprimento utilizando o mesmo material que foi empregado nos 500 dados finais, a extrapolação poderia ser feita. Também, os pontos fracos aparecem apenas em uma parcela dos dados, que se localiza exatamente nos primeiros 700 metros de fibra, podendo-se aí estudar a distribuição de pontos fracos.

Como temos uma margem de segurança na manipulação da fibra no sentido de não introduzir danos durante a caracterização, implicando em uma certa garantia nesta etapa, podemos concluir que estas diferenças de comportamento na ruptura se deve a algum fator durante ou antes do processo de fabricação, uma vez que já se constatou que danos mecânicos na preforma são passíveis de serem transmitidos à fibra.

Após uma análise de todos os procedimentos envolvidos no processo de fabricação da fibra, levantou-se algumas hipóteses das causas que poderiam provocar os pontos fracos constatados. Dois pontos parecem ser importantes, o primeiro está relacionado ao forno onde a preforma é fundida, o segundo na caracterização do bastão de preforma.

Após a fabricação e a caracterização da preforma, esta é levada à torre de puxamento, lá é fundida em uma de suas extremidades, obtendo-se a fibra. O processo de fusão é realizado com o auxílio de um forno de grafite. Este forno é aquecido e limpo antes de se iniciar o processo de fusão. Todavia, se a limpeza for insuficiente, ou devido ao processo natural de envelhecimento do forno, pode-se constatar em sua atmosfera interior a presença de partículas de grafite de diversos tamanhos, que se agregam na superfície da fibra e dão origem a trincas

superficiais.

Sakaguchi [25] mediu a quantidade e tamanho das partículas que se originam durante a operação de um forno deste tipo. Também, fez circular em seu interior uma atmosfera de partículas de tamanho bem definido e obteve a relação entre a resistência mecânica e o tamanho destas partículas.

Na figura 13 representamos a diminuição da resistência devido aos pontos fracos em relação à resistência média, ao mesmo tempo, na ordenada representamos o tamanho da partícula que produziria esta diminuição de resistência segundo Sakaguchi. A curva pontilhada da figura 13 representa qualitativamente como a resistência e o tamanho de partícula varia com o tempo de operação do forno. Esta distribuição de tamanho de partículas, que produz diminuição de resistência mecânica, está de acordo com os resultados de Sakaguchi.

A segunda suspeita, como mencionada antes, pode estar na caracterização da preforma quando esta é introduzida em um compartimento vedado à luz, com a finalidade de se medir alguns parâmetros ópticos importantes. Neste procedimento, a preforma pode sofrer algum dano ao passar por orifícios de borracha, dando origem a defeitos em sua superfície, que comprovadamente se sabe serem transmitidos à fibra após o processo de fusão.

Uma terceira hipótese, de menor possibilidade, seria uma certa irregularidade do diâmetro do núcleo da preforma, motivada por problemas intrínsecos ao processo de deposição de camadas no MCVD. Esta

irregularidade se manifesta por uma diminuição do diâmetro da parte inicial para a parte final da preforma, implicando em uma fibra com diâmetro de núcleo menor no início do que no final da fibra. Por sua vez, esta diferença em diâmetro poderia levar a uma maior probabilidade de ruptura no início da fibra.

3.1.2 - Teste de Prova Mecânica por Flexão em Fibras Ópticas

O ensaio de tensão contínua por um sistema de roletes foi proposto por P. W. France e W. J. Duncan [26]. Na figura 14 pode-se observar esquematicamente o sistema, que consiste de quatro conjuntos de roletes.

Cada conjunto possui três roletes montados em eixos que estão fixos a uma base por meio de rolamentos, cada um alongando a fibra por meio de um esforço de flexão em duas regiões diametralmente opostas da superfície da fibra. Este alongamento é máximo em dois pontos, observando a figura 15 podemos concluir pelo valor máximo de tração nestas regiões:

$$\epsilon_{\max} = \frac{r}{R+r+c} \quad (81)$$

Onde "r" é o raio da fibra, "R" o raio do rolete e "c" a espessura do revestimento primário da fibra.

A distribuição do alongamento em torno destes pontos máximos é dada por:

$$\epsilon = \epsilon_{\max} \cdot \cos \theta \quad (82)$$

Onde θ é o ângulo entre dois raios da fibra, sendo um deles definido pela vertical que passa pelo ponto máximo e o outro pelo ponto que se deseja medir o alongamento. A tensão, portanto, varia de um valor máximo na parte superior até zero no eixo neutro. A parte interna da fibra fica submetida a um esforço de compressão, considerando-se neste caso que o dano provocado não existe.

De forma a aplicar a tensão em toda a superfície da fibra, são montados quatro conjuntos de roletes orientados de 45 graus um em relação ao outro, numa sucessão tal que ao final da passagem temos 8 pontos máximos distribuídos em toda a superfície, vide figura 16.

O alongamento mínimo a que a fibra fica submetida é:

$$\epsilon_{\min} = \epsilon_{\max} \cdot \cos(22.5) \quad (83)$$

Assumindo-se que a fibra não gire em seu eixo longitudinal durante o ensaio, esta é alongada completamente por um valor mínimo dado por 92.4% do alongamento máximo.

A vantagem principal desta técnica, é praticamente a ausência de dano na fibra causado por abrasão, na aplicação do ensaio. A principal desvantagem é que a tensão é aplicada ao máximo em pontos da superfície da fibra e não em seu interior, mas como se pode observar que

as trincas que levam a fratura nas fibras ópticas encontram-se em sua maioria na superfície, isto não é um fator importante para inviabilizar o ensaio.

Uma desvantagem mais séria está no fato, comprovado mais à frente, que pode ocorrer giro da fibra em seu eixo longitudinal quando a mesma passa pelo sistema. Neste caso, a tensão não é aplicada uniformemente na superfície e dá origem a torção na fibra.

Utilizou-se uma fibra obtida por processo MCVD, de produção normal, com cobertura primária em acrilato. De sua totalidade foram separados vários comprimentos, sendo que em um deles, não passado pelo ensaio de tensão contínua, realizou-se 50 ensaios em fadiga dinâmica, com taxa de carregamento de 245 MPa/s.

Após aplicarmos sobre os dados destes ensaios o formalismo desenvolvido na secção 2.2, com o método de quadrados mínimos lineares, obtivemos para "m" de Weibull o valor 114. Outras amostras desta fibra passaram pelo ensaio de tensão contínua, com o equipamento montado com roletes de tamanhos distintos: 24, 12 e 8 mm de diâmetro, correspondendo a alongamentos de 0.5, 1 e 1.5%. Para o cálculo destes alongamentos utilizou-se a equação (81), com a fibra de 125 micros de diâmetro de núcleo e 125 micros de espessura de revestimento primário. Para cada diâmetro passou-se a fibra a três velocidades distintas: 80, 40 e 20 metros por minuto.

Mesmo no regime dinâmico, quando o sistema está a plena velocidade, continua presente uma certa força para se passar a fibra.

Para velocidades mais altas foi necessária uma força também maior para se passar a fibra pelo sistema.

3.1.3 - Teste de Prova Mecânica por Tração em Fibras Ópticas

Foi desenvolvido recentemente no Centro de Pesquisas da Pirelli um equipamento que solicita as fibras por meio de um esforço de tração, através da passagem da fibra por um sistema de roldanas, onde por diferença de diâmetro entre elas é possível controlar o tensionamento. O equipamento de tensão continua por tração entre polias de distintos diâmetros, já vem sendo utilizado há algum tempo [19], sendo hoje equipamentos rotineiros de fabricantes de fibras ópticas no mundo. Podemos observar um esquema na Figura 18.

O equipamento foi projetado obedecendo normas internacionais, especificamente a norma IEC (International Electrotechnical Committee) [27]. De acordo com esta norma, para este tipo de sistema, o tempo que a fibra deve ficar submetida ao tracionamento deve ser aproximadamente de 1 (hum) segundo. Basicamente o projeto do equipamento se resume no dimensionamento das polias motoras, pois estas é que propiciarão o valor de carga desejado.

Foram considerados os seguintes pontos para o desenvolvimento do modelo: - a resistência da fibra óptica só é devido ao núcleo de sílica; - o material da fibra óptica é isotrópico dentro do regime elástico; - a perturbação na carga da fibra óptica é devido à excentricidade das polias, tendo a variação de rotação do motor muito baixo efeito.

Após o ensaio de tensão contínua foram realizados 30 testes de fadiga dinâmica em cada uma das amostras, também com taxa de carregamento de 245 MPa/s. Após aplicarmos o formalismo de Weibull nas condições já mencionadas, obtivemos os dados da Tabela I.

Como já visto, o dano produzido na fibra é proporcional a tensão aplicada " σ "

e ao tempo de aplicação da tensão " t ", de acordo com a equação (71). Deve-se esperar, portanto, que quanto menor o raio do rolete do sistema, maior o dano causado a fibra, uma vez que a tensão aplicada é maior.

Na Figura 17 pode-se observar um gráfico no qual foram plotados os dados da Tabela I: no eixo das ordenadas os parâmetros m de Weibull, e no eixo das abcissas o diâmetro dos roletes, com as curvas sendo levantadas para as três velocidades. Imediatamente constata-se que para diâmetros e velocidades cada vez menores, maior é o dano provocado, ou seja, menores os parâmetros de Weibull obtidos, coincidindo com as previsões iniciais.

Durante a operação do sistema foram notados: quanto maior o nível de tensão, ou menor o diâmetro dos roletes, maior é a força que se deve aplicar para passar a fibra pelo sistema. Esta força adicional dá origem a uma segunda tensão de prova que se soma àquela devido a flexão nos roletes. Não foi possível medir esta segunda tensão de prova.

Na Figura 19 temos o esquema do sistema de tracionamento. De acordo com esta figura, a equação de continuidade de massa é:

$$M_{pto 1} = M_{pto 2} \quad (84)$$

ou

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot S_2 \quad (85)$$

$\rho_1 = \rho_2$, densidades da fibra óptica.

$$V_1 = 2 \cdot \pi \cdot \omega_1 \cdot R_1 \quad (86)$$

Com $\omega_1 = \omega_2$ e $V_2 = 2 \cdot \pi \cdot \omega_2 \cdot R_2$.

$$S_1 = \frac{\pi \cdot (d_1)^2}{4} \quad (87)$$

Com $S_1 = S_2$ e $S_2 = \frac{\pi \cdot (d_2)^2}{4}$.

$d_1 = d_2$ diâmetros da fibra.

De (85):

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \frac{R_2}{R_1} \quad (88)$$

Para um elemento de fibra óptica de comprimento l_1 , com diâmetro d_1 , antes da entrada na polia 1, este mesmo elemento apresentará comprimento l_2 e diâmetro d_2 no trecho tensionado (entre as polias 1 e 2). Como o material é tensionado dentro do regime elástico e é isotrópico, vale:

$$\delta_1 = \frac{r_1}{\left(\pi \cdot (d_1)^2 \cdot \frac{l_1}{4}\right)} \quad (89)$$

O mesmo vale para o ponto 2 com a equação 89 com subíndice 2. Então, para $R_1 = R_2$ e $\delta_1 = \delta_2$ temos:

$$\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \frac{l_2}{l_1} \quad (90)$$

Para o mesmo elemento considerado anteriormente, pela Lei de Hooke:

$$\sigma_{FO} = \left(\frac{l_2 - l_1}{l_1}\right) \cdot E \quad (91)$$

Onde σ_{FO} é a tensão na fibra óptica entre as polias 1 e 2, e "E" é o módulo de elasticidade da fibra óptica (73 GPa). Portanto,

$$\sigma_{FO} = \left(\left(\frac{R_2}{R_1} \right) - 1 \right) \cdot E \quad (92)$$

Por definição utilizamos $R_1=50$ mm, logo, na Tabela II, utilizando a equação (3), temos os alongamentos de interesse para os raios da segunda roldana.

As especificações do motor utilizado foram tais que para uma velocidade máxima de 3 m/s e alongamentos de até 1.5%, a variação de rotação do motor não perturba significativamente a carga na fibra óptica no trecho tensionado. Não podemos deixar de mencionar uma importante vantagem deste sistema sobre outros similares, que é ausência de tensão na fibra óptica na saída do equipamento, que seguramente não é o caso do teste de prova por flexão.

Para os testes neste sistema utilizamos uma fibra óptica obtida por processo MCVD, com cobertura primária em acrilato. De sua totalidade foram separados vários comprimentos passando pelo sistema em diferentes condições: - alongamentos de 0.5%, 1.0% e 1.5%. - velocidades de passagem de 30,70,100,160 e 190 metros por minuto.

Após os testes de provas, foram realizados ensaios de 30 quebras por fadiga dinâmica em cada uma das amostras, com taxa de carregamento de 100 MPa/s. Aplicando-se o formalismo de Weibull, foram obtidos os

dados da Tabela III para o parâmetro "m" de Weibull.

De acordo com as considerações já vistas para o dano provocado pelo sistema, deve-se esperar que quanto maior a razão entre as polias maior o dano causado à fibra óptica, uma vez que a tensão aplicada é maior. Também, quanto menor a velocidade de passagem da fibra óptica, maior é o dano causado, já que maior será o tempo que o material ficará submetido à tensão. Além disso, deve-se esperar maior dano devido a variações na tensão do que no tempo, já que na expressão para o tempo de vida a tensão aparece exponenciada por um termo da ordem de "25".

Na Figura 20 pode-se observar um gráfico no qual foram representados os dados da Tabela III: no eixo das ordenadas os parâmetros "m de Weibull", no eixo das abcissas as velocidades de passagem da fibra pelo sistema, com as curvas levantadas para os três alongamentos utilizados. Imediatamente constatamos da figura que para velocidades menores e tensões maiores, maior é o dano provocado, ou seja, menor os valores de "m" obtidos, coincidindo com as previsões iniciais. A velocidade recomendada pela norma IEC, para o nosso teste de prova mecânica, é de 120 m/min, já que o comprimento tracionado é de aproximadamente 2 metros. Observando a figura não encontramos nenhuma razão que justifique esta velocidade como sendo a mínima a ser utilizada, pelo contrário, já que para outras velocidades encontramos melhor qualidade, expressa por valores maiores de "m de Weibull".

Devemos observar que durante a operação do sistema foram notados

alguns problemas: para um perfeito funcionamento deste sistema foi necessária a inclusão de um "freio", por meio do qual se alimenta de forma uniforme a entrada da fibra. Por outro lado, este mesmo freio, principalmente a maiores velocidades, adiciona tensão na linha, ou seja, surge uma força a mais além daquela prevista pela diferença de diâmetro das polias. Estas forças adicionais são da ordem de 1/10 daquela equivalente ao teste de prova de 1% de alongamento.

3.2 - Delineamento de Experimentos

Em muitos experimentos é interessante conhecer os efeitos que cada fator de controle exercem sobre o mesmo, definindo-se como fator de controle aquelas modificações que podemos controlar, por exemplo a velocidade de passagem da fibra pelos testes de prova mecânica. Se partimos de experimentos isolados, tentando variar cada fator e medindo seu efeito sem um critério definido, se corre o risco de realizar uma série enorme de experimentos sem nenhuma conclusão a respeito de seus efeitos ou da interação com outros fatores. Além disso, para uma análise completa muitas vezes não é suficiente variar apenas um fator de cada vez, ou seja, a combinação dos fatores de controle em diferentes níveis devem ser medidas.

No delineamento de experimentos os efeitos de cada fator podem ser determinados com a mesma precisão como se houvésssemos apenas variado um dos fatores, e também podemos medir a interação entre eles.

Devemos observar neste ponto que é possível se aumentar a qualidade da análise precisando ainda mais os efeitos, o que é feito simplesmente repetindo o experimento, o que se costuma denominar de "replicação". Quanto maior o número de replicações, menor o intervalo de confiança sobre cada um dos efeitos, precisando melhor suas variações.

Um delineamento típico é o dois elevado à terceira potência, ou seja, o caso em que temos três fatores de controle, onde se varia cada

fator em dois níveis. A partir da medida de resultados do experimento com a variação destes três fatores, cada um deles variando apenas duas vezes, se obtém toda a informação necessária de seus efeitos sobre o experimento.

As características de um Equipamento de Teste de Prova Mecânica permiti-nos apenas, tanto do ponto de vista teórico, quanto do ponto de vista prático, a variação de dois fatores, que é a velocidade de passagem da fibra pelo sistema (que determina o tempo de aplicação da tensão) e o nível de tensão aplicada. Como tínhamos dois sistemas a analisar, cada sistema atuando por princípio distinto, assumimos o tipo de teste como o terceiro fator. Variando cada um deles em dois níveis, estávamos na situação típica do delineamento "dois elevado à terceira".

Por outro lado, os resultados que nos interessavam, que era as medidas da resistência mecânica após o teste de prova, podia ser avaliada por meios distintos. Podíamos medir as resistências utilizando a função de Weibull, ou medir o parâmetro de susceptibilidade a fadiga "n". Então, para sermos mais precisos em nossa análise realizamos dois delineamentos, em um deles variamos os fatores e medimos a função de Weibull, já no outro delineamento, com variações de fatores idênticas ao primeiro, medimos o parâmetro "n". É óbvio que não podíamos utilizar o mesmo material para medir Weibull e "n", pois os ensaios para as medidas tanto de um quanto de outro são destrutivos.

Uma vez definido o tipo de delineamento e quais resultados medir,

restava analisar que níveis empregar para cada um dos fatores. Obviamente o fator "tipo de teste" assume os níveis: teste de prova por flexão e teste de prova por tração. Para o fator "nível de tensão" utilizamos dois níveis típicos: 0.350 GPa e 0.70 GPa, que correspondem a alongamentos de 0.5% e 1.0% respectivamente. O terceiro fator, que é a velocidade de passagem da fibra pelo sistema, não podia assumir os mesmos níveis para os diferentes sistemas, já que não se conhecia qual a implicação da velocidade sobre a resistência mecânica no caso do teste de prova de roletes. Portanto, utilizamos para o sistema de tração dois níveis típicos: 60 (V1) e 120 (V2) metros por minuto. Para o teste de provas de roletes empiricamente utilizamos: 35 (V1) e 70 (V2) metros por minuto. Estes valores, na verdade, foram escolhidos observando-se a dificuldade de passagem da fibra por este sistema. Para velocidades maiores que 70 metros por minuto surgiram problemas, que descreveremos mais adiante.

Ainda devíamos observar mais um ponto, como visto na secção 3.1.1 é muito importante a posição da amostra quando se deseja comparar resistência mecânica ao longo do comprimento. Para os delineamentos passava a ser fundamental aleatorizar as amostras, misturando-as de forma a evitar uma superposição dos efeitos da resistência ao longo do comprimento, em detrimento dos efeitos dos testes de prova sobre as amostras. Também, como medimos dois resultados, utilizamos uma única fibra óptica, possibilitando-nos a comparação entre eles.

A fibra utilizada foi uma fibra monomodo, recoberta em acrilato,

com características ópticas normais, ou seja, atenuação óptica de 0.35 dB por quilômetro, comprimento de onda de corte de 1200 nanômetros, curva de atenuação no OTDR sem degraus maiores que 0.1 dB, diâmetro de campo modal de 9 microns, dispersão cromática de 3 ps/nm/km e comprimento de 5600 metros.

3.2.1 - Delineamento Weibull

Como visto no item anterior, nossos fatores foram: velocidade de passagem da fibra pelo sistema (denominado fator A), nível de tensão aplicada no experimento (denominado fator B) e tipo de teste de prova (denominado fator C). Como a quantidade de fibra a ser empregada na caracterização de Weibull é bem menor do que na de "n", fizemos os experimentos aqui com três (3) replicações. Na tabela IV temos as condições para o delineamento.

Nesta tabela podemos observar os fatores A, B e C, os sinais + e - indicam os níveis mais altos e mais baixos respectivamente. Logo abaixo da tabela a legenda detalha os valores utilizados.

Na tabela V temos cada um dos experimentos com as respectivas condições dos fatores em cada um deles, por exemplo, para o teste de prova de roletes (C-), empregou-se no experimento 3 a velocidade de 35 metros por minuto (A-) e o nível de tensão correspondente a 1.0% de alongamento (B+). Logicamente os oito experimentos englobam todas as situações possíveis de três fatores a dois níveis, ou dois elevado a terceira potência.

Na mesma tabela V temos as ordens experimentais para cada uma das três replicações, por exemplo, na replicação 1 (R1) o primeiro experimento a ser realizado foi o experimento 4 (++-). A ordem destas replicações foram obtidas por sorteio.

Da função de Weibull obtemos dois parâmetros importantes (S_0 e m), vide secção 2.2, estes parâmetros foram analisados separadamente. Tratemos primeiro do parâmetro "m".

3.2.1.1 - Resultados de "m"

Na tabela VI temos os resultados dos parâmetros "m" medidos após cada experimento em cada uma das replicações. Na última coluna estão os valores médios das três replicações para cada condição experimental. Nesta tabela, na última coluna, estão as denominações comuns dadas a estas médias.

Na tabela VII está o procedimento para se calcular os efeitos e as interações entre os efeitos, basta realizar uma operação de sinais entre colunas utilizando para cálculo as médias à esquerda. Por exemplo, o efeito do fator A se mede pela média entre as somas de Y_2, Y_4, Y_6 e Y_8 subtraído de Y_1, Y_3, Y_5 e Y_7 (todos os de sinais positivos menos os de sinais negativos). Para a interação entre AB, é a média entre as somas de Y_1, Y_4, Y_5 e Y_8 subtraído de Y_2, Y_3, Y_6 e Y_7 . Obtivemos então os valores para os efeitos indicados na tabela VIII.

3.2.1.2 - Curvas de Interações para "m"

É possível, utilizando a mesma tabela VII traçar curvas de interações entre os efeitos, basta fixar um dos fatores e analisar outro

qualquer por meio dos resultados dos experimentos. Por exemplo, na figura 21 temos a interação velocidade-tensão (AB) para o parâmetro "m", neste caso o ponto da esquerda para 0.5% de alongamento (B-) foi obtido olhando a coluna de A indo de - para + e calculando com as médias. De outra forma, para B negativo, A vai de 136.450 para 126.097, mais abaixo temos novamente B negativo e A indo de 141.933 para 143.033. O ponto da esquerda é a média entre 136.450 e 141.933 (139.19). O ponto da direita para os mesmos 0.5% é a média entre 126.097 e 143.033 (134.56). Então, para 0.5% quando aumentamos a velocidade de 35 para 70 metros por minuto, o valor de "m" cai de 139.19 para 134.56. Observamos que este comportamento vale tanto para um tipo de teste quanto para o outro, já que nesta interação não fica discriminado o tipo de teste.

Nas figuras 22, 23, 24 e 25 estão plotadas as outras interações possíveis para o parâmetro "m". Pode-se observar nestas figuras uma faixa de erro para estes valores, vamos tratar deste assunto logo a seguir.

3.2.1.3 - Estimativa do Intervalo de Confiança para os Efeitos

Podemos com base nos resultados para as replicações e com base nas médias para cada experimento, calcular a variância dos efeitos e estimar uma confiança para eles utilizando a tabela de distribuição "F", que pode ser encontrada em qualquer livro de estatística básica.

O procedimento consiste em tomar a variância para cada experimento, por exemplo, a variância para o experimento 1 é a soma dos quadrados das diferenças entre "m" para cada replicação e o valor médio 136.450, tudo isto dividido por 2 (que é o número de graus de liberdade para este caso). Fornece-nos o valor 99.611. Somando as variâncias dos oito tipos de experimentos e fazendo a média temos o valor 353.349. A variância geral é a raiz quadrada da média dessas oito: 18.798.

O intervalo de confiança deve ser compensado pelo número de replicações e pelo grau de confiança exigido. Se tomamos 95% de confiança com 16 graus de liberdade para a variância geral (24 total menos 8 devido ao cálculo das médias), olhando a tabela "F" encontramos o valor 4.49. A compensação é feita dividindo-se a variância geral pela raiz quadrada do número de replicações vezes dois, que nos fornece 7.674, multiplicamos ainda este valor pela confiança obtida da tabela "F" e calculando a raiz quadrada. O valor do intervalo de confiança para os efeitos de "m" é portanto de 16.261, com 95% de segurança.

Repetindo o mesmo procedimento para 90% de confiança, obtemos o valor 13.402 para o intervalo dos efeitos.

Na tabela IX temos um resumo destes cálculos.

Nas figuras 21, 22, 23, 24 e 25 podemos observar estes intervalos de confiança já plotados para cada ponto de efeito de interação.

3.2.1.4 - Resultados de "So" e seus Efeitos

Na tabela X temos os resultados dos parâmetros "So" obtidos das mesmas Weibull que forneceram os parâmetros "m" acima.

Na tabela XI temos os resultados dos efeitos calculados para o parâmetro "So" calculado de maneira análoga ao item 3.2.1.1.

3.2.1.5 - Curvas de Interações de "So"

Com uma tabela análoga à tabela VII obtivemos as curvas de interações para o parâmetro "So". Nas figuras 26, 27, 28, 29 e 30 estão as curvas de interações para "So".

3.2.1.6 - Estimativa do Intervalo de Confiança para os Efeitos

Na tabela XII temos um resumo dos cálculos para a estimativa do intervalo de confiança para os efeitos de "So".

3.2.2 - Delineamento Parâmetro de Susceptibilidade "n"

De forma análoga ao exposto para o delineamento Weibull foi realizado um delineamento para o parâmetro de susceptibilidade à fadiga "n", replicando o experimento duas vezes.

Como descrito no item 2.3 uma das formas de se avaliar este parâmetro é realizar ensaios de ruptura a várias taxas de carregamento. Então, separamos da mesma fibra utilizada no delineamento Weibull 16 amostras de aproximadamente 200 metros cada, que foi suficiente para a realização de ensaios de ruptura a 6 taxas de carregamento distintas, após passarem pelas diferentes situações de teste de prova. Para cada taxa de carregamento foram realizados 30 ensaios de ruptura, que após a aplicação da função de Weibull forneceram as 6 tensões características para a determinação do valor de "n", por regressão linear.

Como o delineamento para "n" foi idêntico ao de Weibull, continua valendo a mesma tabela IV, a diferença apenas consiste no número de replicações, que agora foram duas.

3.2.2.1 - Resultados "n"

Na tabela XIII temos os resultados dos parâmetros "n" obtidos para as duas replicações, e também os valores médios para cada con-

dição experimental. É bom lembrar que a ordem para a realização dos ensaios nos testes de prova foram sorteadas nas duas replicações.

Na tabela XIV temos os valores dos efeitos para cada fator, calculados como descrito no item 3.2.1.1.

3.2.2.2 - Curvas de Interações "n"

Foram levantadas as curvas de interações entre os fatores, utilizando a mesma tabela VII para o cálculo dos sinais. Os resultados destas interações podem ser vistas nas figuras 31, 32, 33, 34 e 35.

3.2.2.3 - Estimativa do Intervalo de Confiança

De maneira análoga à descrita no item 3.2.1.3 calculamos o intervalo de confiança para os efeitos, que já aparecem plotados nas curvas de interações para "n". Na tabela XV temos um resumo dos cálculos para o intervalo de confiança.

3.3 Análise de Variâncias

Com o objetivo de medir o significado dos resultados de "m", "So" e "n" encontrados, aplicamos a análise de variância sobre estes três parâmetros e comparamos com as variâncias tabeladas, fornecidas pela função "F" para o mesmo número de graus de liberdade. Utilizamos 95% de confiança para "So" e "n" e 90% de confiança para "m".

Vamos descrever os cálculos da análise de variância para "m".

Calculemos a soma de quadrados dos efeitos, o que é feito aplicando-se a fórmula geral [24]:

$$SQE = 2 * r * E^2 \quad (93)$$

Onde r é o número de replicações e E o efeito do fator ou das interações entre os fatores, que para "m" estão listados na tabela VIII.

Para uma melhor compreensão acompanhem os cálculos por meio da tabela XVI, que é a análise de variâncias para "m".

Na coluna "Fonte" aparecem as fontes de variações, ou seja, os

fatores e suas interações. Nestas tabelas o tipo de teste foi denominado de "SCRE", uma abreviação para o termo em inglês "screen test". Ainda nesta primeira coluna temos o resíduo e o total.

Na coluna "Soma de Quadrados" aparecem os resultados dos quadrados para cada fonte de variação, que somados fornece a soma de quadrados dos efeitos. Observamos que o residual e o total são calculados de maneira distinta. O total é dado por:

$$SQT = \sum (Y_{ri})^2 - \frac{(\sum Y_{ri})^2}{n} \quad (94)$$

Onde Y_{ri} são cada um dos 24 valores de "m" e n é o número de resultados (24).

Já o residual é dado por:

$$SQR = SQT - \sum SQE \quad (95)$$

Na coluna "Graus de Liberdade" aparece o grau de liberdade para cada efeito, ou suas interações, também aparecem o residual e o total.

Na coluna "Quadrado Médio" aparecem os quadrados médios para cada efeito, o que é obtido dividindo-se o quadrado do fator pelo número de graus de liberdade deste fator.

Finalmente a função "F" calculada para cada efeito, é obtida dividindo-se o quadrado médio do fator pelo quadrado médio do resíduo.

O valor "F crítico" foi tomado para 90% de confiança, com 16 graus de liberdade para o resíduo e os fatores tomados um a um (16,1).

Por procedimento exatamente análogos obtivemos as Análises de Variâncias para "So" e "n", nas tabelas XVII e XVIII respectivamente.

3.3 - Equação Representativa

Com base nos resultados da análise de variâncias e do delineamento de experimentos é possível se escrever a "equação que representa o fenômeno". A forma geral desta equação é [24]:

$$\bar{Y} = \mu + \frac{E_A}{2} \cdot X_A + \dots + \frac{E_{ABC}}{2} \cdot X_A \cdot X_B \cdot X_C \quad (96)$$

Onde μ

é a média geral, E_i são os efeitos de cada um dos fatores, ou suas interações.

Com esta equação é possível se prever o valor do parâmetro \bar{Y}

4 - Discussão dos Resultados

4.1 - Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para o Parâmetro "m" de Weibull.

Analisemos em primeiro lugar os resultados do delineamento experimental.

Na tabela VIII podemos observar os resultados dos cálculos dos efeitos e das interações dos fatores para o parâmetro "m" de Weibull. Na tabela IX a estimativa de variância deste parâmetro, que nos leva ao intervalo de confiança em torno dos efeitos.

Nas figuras 21, 22, 23, 24 e 25 os gráficos destas interações, já com os intervalos de confiança em cada ponto de variação.

As interações são os cruzamentos das linhas que interligam as variações de um fator, quando se mantém fixo o outro.

Pelos valores encontrados para as interações e pelos gráficos, de imediato se pode concluir que o intervalo de confiança não permite confirmar qualquer uma delas, estando aquele intervalo bem acima das faixas de variações dos fatores.

Não podemos concluir por nenhuma interação entre fatores justificada pelos valores obtidos do parâmetro "m". Por exemplo, na figura 21 temos o gráfico de interação entre velocidade-tensão, se percebe que o cruzamento, que indicaria que estes dois fatores se relacionam, pode muito bem não ocorrer já que a faixa de erro é muito grande.

Por outro lado, podemos sugerir, observando as figuras das interações, que com o parâmetro "m" detectamos uma perda de resistência nas amostras, indicada pela redução dos valores de "m", quando aumentamos a velocidade e mantemos fixa a tensão. Este resultado vale para os dois tipos de teste de prova. Esta afirmação confirma aqueles resultados obtidos nos testes preliminares, onde qualitativamente se obteve a redução de resistência mecânica pela variação do parâmetro "m".

As outras curvas de interação indicam o mesmo resultado, ou seja, sempre que aumentamos a atuação de um certo fator, mantendo fixo o outro, obtemos queda do valor de "m", que significa redução de resistência mecânica.

Também, além dos testes preliminares, esperávamos estes resultados devido as equações de dano no teste de prova, que indicam perda de resistência se aumentamos a tensão do teste ou se aumentamos o tempo do teste.

Ainda para "m", quando comparamos os dois tipos de teste por meio da interação tripla, observamos que o teste de prova de flexão nos dois níveis de tensão de teste, diminuiu sensivelmente a resistência das amostras. Já no teste de prova de tração este fato só ocorreu para o nível de tensão mais alto, permanecendo constante no nível mais baixo.

A análise de variâncias para "m" (tabela XVI) confirma os

resultados do delineamento. Os valores da função F calculados para todas as fontes são sempre inferiores aos valores da função F para um nível crítico de 90% de confiança que seja. O resíduo nesta análise indica sem sombra de dúvidas que a variação de "m" não é explicada somente pela variação destes fatores propostos, devem existir outros que complementariam a análise. Para concluir: não se pode prever o valor de "m" variando somente estes fatores, o resíduo indica um vazio a ser preenchido por outros fatores.

Com base nos dados apresentados, não tem sentido escrever uma equação para "m" devido aos pequenos efeitos que apresentaram os fatores, e devido ao alto resíduo na análise de variância.

4.2 - Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para o Parâmetro "So" de Weibull

Nas tabelas XI e XII e nas figuras de 26 a 30 temos os resultados para o delineamento.

Estes resultados indicam que o único efeito sobre os valores de "So" estão no fator tipo de teste (SCREEN), ali o intervalo de confiança foi menor que o efeito do fator. O fator tensão ficou praticamente no limite, com o efeito da ordem do intervalo de confiança. Portanto, o tipo de teste é determinante para explicar a queda de resistência já observada.

Quando observamos as curvas de interação tripla constatamos

comportamento distinto entre os tipos de teste, para o de flexão sempre temos uma queda acentuada de "So", quando aumentamos a velocidade, para os dois níveis de tensão. Para o teste de prova de tração o comportamento é diferente para os dois níveis de tensão, e observando o intervalo de confiança podemos muito bem supor que "So" permaneceu constante.

A análise de variância (tabela XVII) confirmou os resultados do delineamento, apresentando como única fonte importante o tipo de teste (SCREEN). Para 90% de confiança o fator tensão poderia também ser importante para se prever os valores de "So".

Concluindo: o que mais influenciou o fator "tensão de localização So" foi o tipo de teste, e dos dois tipos o que reduziu sempre a tensão foi o teste de flexão.

O volume do resíduo indica que outros fatores devem ser investigados para se obter uma previsão segura do parâmetro de localização "So".

Também neste caso não tem sentido se escrever uma equação de previsão para "So", já que os efeitos dos fatores foram pequenos e o resíduo na análise de variância muito grande.

4.3 - Delineamento de Experimentos e Análise de Variância para o Parâmetro "n"

Os resultados estão nas tabelas XIV e XV e nas figuras de 31 a

Pelo resultado do delineamento concluímos que dois efeitos são importantes para os resultados de "n" obtidos: o efeito da velocidade e a interação entre a velocidade e o tipo de teste.

De uma forma geral as curvas de interações indicaram queda do valor de "n" quando se aumenta o nível dos fatores. Quando comparamos os dois tipos de teste na interação tripla confirmamos os resultados obtidos com o parâmetro "So" de Weibull, ou seja, o teste de prova de flexão diminui sempre a resistência da amostra, não importando o nível de tensão. Já o teste de prova de tração, quando observamos o intervalo de confiança, pode indicar que "n" cai bem menos ou que fica constante quando aumentamos a velocidade do teste.

Nestas curvas a interação entre velocidade e tipo de teste (figura 32) também é clara, com o intervalo de confiança não impedindo esta conclusão. Como existe esta interação, que é um resultado conjunto para os dois tipos de teste, a interação tripla indicou o teste de flexão como responsável por ela.

A análise de variância (tabela XVIII) também confirmou o delineamento.

De imediato, pelo valor do resíduo se pode afirmar que o parâmetro "n" é muito mais completo e seguro para descrever a perda de resistência nestes testes do que os parâmetros de Weibull.

A análise confirmou de forma definitiva o fator velocidade e a interação entre velocidade e o tipo de teste, como os grandes efeitos

que podem descrever os valores encontrados de "n".

Seguramente este parâmetro não pode ser encarado como um valor constante e pode perfeitamente ser utilizado para medir perda de qualidade em testes deste tipo.

Neste caso, pelos resultados obtidos, podemos escrever a equação de previsão para "n":

$$n = 22.23 - (2.16)A + (2.42)AC \quad (97)$$

Por exemplo, para A(-) e C(-) pela equação preve-se $n=26.81$, e observando a tabela de resultados para este caso temos na média o valor 28.09, que é bastante próximo.

5 - Conclusões

5.1 - Pela operação o teste de prova de flexão se mostrou um sistema de difícil controle.

5.2 - A velocidade se mostrou importante porque os dois sistemas apresentaram "tensões mais altas adicionais" quando a velocidades mais altas.

5.3 - O parâmetro "m" de Weibull apresentou resíduo considerável na análise de variâncias, mostrando que outros fatores devem ser investigados para que se possa prever seu valor em testes como estes. Por outro lado "m" foi importante para se observar perda de qualidade quando da análise das curvas de interações.

5.4 - Pela estreita faixa de variação do parâmetro "So" de Weibull, e pela sua variância, se mostrou também deficiente para medir a variação de resistência nestes testes, apesar de mostrar uma importante relação entre a resistência e o tipo de teste de prova.

5.5 - Por 5.3 e 5.4 se conclui que utilizando somente Weibull não é suficiente para prever o dano mecânico nestes dois testes de provas.

Os fatores que controlam a variação dos parâmetros da função não são sómente aqueles que controlam o teste de prova.

5.6 - O parâmetro "n" indicou uma variação de resistências. Indicou também uma razoável significância da velocidade para explicar esta variação.

Seu baixo resíduo na tabela de variâncias, e seu comportamento bem definido no delineamento, o garante como um parâmetro não constante e útil para descrever o dano mecânico nestes sistemas.

5.7 - O teste de prova de flexão, tanto no que se deduz devido a "n", quanto devido aos parâmetros da função de Weibull, danificou mais as amostras.

6 - Trabalhos Futuros

Seguramente um trabalho interessante será investigar uma possível relação entre os diferentes tipos de testes de prova e outros fatores. Podemos por exemplo citar a variação dimensional da fibra ao longo de seu comprimento, que apesar de pequena pode ser importante, principalmente no teste de provas de roletes.

A comparação destes dados com os obtidos de um terceiro teste de prova também parece ser importante, onde teremos a oportunidade de confirmar ou não estas conclusões.

A realização de ensaios em meio inerte e a aplicação direta das equações de dano mecânico obtidas da Teoria de Fratura, também poderão confirmar ou não estes resultados.

7 - Referências

- 7.1 - Griffith, A. A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Phil. Trans. Roy. Soc., A221(1920), pp. 163-198.
- 7.2 - Weibull, W., "A Statistical Theory of the Strength of Materials", Ingeniör Vetenskaps Akademien Handlingar, 151(1939), pp. 5-45.
- 7.3 - Evans, A. G. and Wiederhorn, S. M., "Proof Testing of Ceramic Materials - an Analytical Basis for Failure Prediction", Int. Journ. of Fracture, 10(1974), pp. 379-392.
- 7.4 - Freiman, S. W., "Fracture Mechanics of Glass", Academic Press, Glass Science and Technology, 2(1980), pp. 21-78.
- 7.5 - Inglis, C. E., Trans. Inst. Nav. Arch., 55(1913), pp. 219-229.
- 7.6 - Irwin, G. R., Encyclopedia of Physics, 6(1958), pp. 551-590.
- 7.7 - Brown, W. F. and Srawley, J. E., ASTM, STP 410(1967).
- 7.8 - Charles, R. J., Static Fatigue of Glass I, Journ. of Appl. Phys., 29(1958), pp. 1549-1553.

- 7.9 - Evans, A. G., "Slow Crack Growth in Brittle Materials Under Dynamic Loading Conditions", Int. Journ. of Fract., 10(1974), pp. 251-259.
- 7.10 - Evans, A. G. and Fuller, E. R., "Proof Testing - The Effects of Slow Crack Growth", Mat. Sci. and Engin., 19(1975), pp. 69-77.
- 7.11 - Camilo, G. M., "Estudo Estatístico da Fratura Frágil", Tese de Mestrado em Física, Instituto de Física, UNICAMP, 1985.
- 7.12 - Camilo, G. M. e Medrano, R. E., "Teoria Estatística de Fratura Frágil Aplicada ao Ensaio de Flexão", Anais do VIII COBEM, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 12/1985, pp. 845-848.
- 7.13 - Camilo, G. M., Kittl, P. e Medrano, R. E., "Estudo Estatístico da Fratura Frágil", Anais do VI CBECIMAT, Rio de Janeiro, 1984, pp. 237-241.
- 7.14 - Kapur, K. C. and Lamberson, L. R., "Reliability in Engineering Design", New York, John Wiley & Sons, 1977.
- 7.15 - Kimball, B. F., "On the Probability Paper", Am. Statist. Assoc. Journ., 9(1960), p. 546.

- 7.16 - Bergman, B., "On the Estimation of the Weibull Modulus", Journ. Mater. Sci. Let., 3(1984), p. 689.
- 7.17 - Camilo, G. M., Wisnik, N. S. e Medrano, R. E., "Susceptibilidade a Fadiga de Fibras Opticas do Sistema Telebras", V SBT, UNICAMP, 1987, pp. 323-326.
- 7.18 - Ritter Jr., J. E., "Engineering of Materials"; Fracture Mechanics of Ceramics, Vol 4, Plenum Press, New York, 1978, pp. 667-686.
- 7.19 - Fukutomi, H., "Optical Fiber Cable", The Telecommunications Association, Tokyo, Japan, 1986.
- 7.20 - Kalish, D. and Tariyal, B. K., "Static and Dynamic Fatigue of a Polymer-Coated Fused Silica Optical Fiber", Journ. Am. Ceram. Soc., 61(1978), p. 518.
- 7.21 - Lucas, M. A. R., "Fadiga Dinâmica em Fibras Opticas", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP, 1985.
- 7.22 - Pinto, F., "Relação Entre a Tensão e a Resistência Mecânica de Fibras Opticas", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP, 1990.

7.23 - Box, G. and Hunter, W. G., "Statistics for Experimenters", John Wiley, New York, 1978.

7.24 - Duncan, A. J., "Quality Control and Industrial Statistics", Richard D. Irwin Inc., Homewood, Illinois, 1986.

7.25 - Sakagushi, S., Nakahara, M. and Tajima, Y., "Drawing of High-Strength Long-Length Optical Fibers", Journ. of Non-Crystal. Solid., 64(1984), pp. 173-183.

7.26 - France, P. W. and Duncan, W. J., "Proof Testing of Fiber Optics", Adv. in Ceram., Vol II, Phys. of Fib. Opt., 1981.

7.27 - International Electrotechnical Commission, Sub-Committee 46E: Fibre Optics, Section Three.

```

*****
* Diâmetro * Velocidade * "m" *
* dos * da * de *
* Roletes * Fíbra * Weibull *
* (mm) * (m/min) * *
*****
* * * *
* * 80 * 158 *
* 24 * 40 * 144 *
* * 20 * 122 *
* * * *
*****
* * * *
* * 80 * 136 *
* 12 * 40 * 121 *
* * 20 * 101 *
* * * *
*****
* * * *
* * 80 * 116 *
* 08 * 40 * 81 *
* * 20 * 97 *
* * * *
*****

```

TABELA I - Parâmetros de Weibull obtidos dos insaios de fadiga dinâmica nas amostras após os ensaios de tensão contínua.

```

*****
*           *           *
* Alongamento * Raio *
*   (%)       *   R2  *
*           *   (mm) *
*           *           *
*****
*           *           *
*   0.5      *  50.25 *
*           *           *
*****
*           *           *
*   1.0      *  50.50 *
*           *           *
*****
*           *           *
*   1.5      *  50.75 *
*           *           *
*****

```

TABELA II - Alongamento na fibra óptica para os diversos raios da segunda roldana no teste de prova mecânica por tração.

```

*****
*                               *                               *
* Alongamento * Velocidade * "m" *
*   (%)        * (m/min)   *      *
*                               *                               *
*****
*           * 30 * 40.72 *
*           * 70 * 48.43 *
*   0.5     * 100 * 50.92 *
*           * 160 * 53.72 *
*           * 190 * 66.52 *
*****
*           * 30 * 38.68 *
*           * 70 * 47.93 *
*   1.0     * 100 * 49.46 *
*           * 160 * 52.80 *
*           * 190 * 61.54 *
*****
*           * 30 * 36.34 *
*           * 70 * 43.58 *
*   1.5     * 100 * 45.28 *
*           * 160 * 53.04 *
*           * 190 * 59.19 *
*****

```

TABELA III - Parâmetros "m de Weibull" para cada condição de ensaio para o teste de prova de tração.

DELINEAMENTO WEIBULL

		(-)	(+)
A	veloc	V1	V2
B	tensao	0.5%	1.0%
C	tipo	TP1	TP2

TP1 Flexão

TP2 Tração

$V1(TP1) = 35 \text{ m/min}$

$V2(TP1) = 70 \text{ m/min}$

$V1(TP2) = 60 \text{ m/min}$

$V2(TP2) = 120 \text{ m/min}$

TABELA IV – Delineamento Weibull

Experimento	A	B	C		R1	R2	R3
1	-	-	-		4	6	6
2	+	-	-		3	4	5
3	-	+	-		5	1	7
4	+	+	-		8	8	8
5	-	-	+		7	5	3
6	+	-	+		6	2	4
7	-	+	+		1	3	2
8	+	+	+		2	7	1

24 experim - 100 m cada

TABELA V - Ordem dos experimentos e replicações.

REPLICAÇÕES				
R1	R2	R3	MEDIA	
136.570	146.370	126.410	136.450	Y1
136.970	127.930	113.390	126.097	Y2
117.480	121.880	160.200	133.187	Y3
136.620	119.140	128.000	127.920	Y4
170.080	129.560	126.160	141.933	Y5
139.130	148.710	141.260	143.033	Y6
135.610	120.460	182.070	146.047	Y7
103.700	129.750	136.810	123.420	Y8

TABELA VI - Resultados de "m" para o delineamento Weibull.

MEDIAS	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Y1	-	-	-	+	+	+	-
Y2	+	-	-	-	-	+	+
Y3	-	+	-	-	+	-	+
Y4	+	+	-	+	-	-	-
Y5	-	-	+	+	-	-	+
Y6	+	-	+	-	+	-	-
Y7	-	+	+	-	-	+	-
Y8	+	+	+	+	+	+	+

TABELA VII – Procedimento para cálculo dos efeitos, com base nas médias Y_i .

```

*****
*           *   Efeito dos           *
*   EFEITO *   Fatores e suas       *
*           *   Interações           *
*****
* VELOC    *           -9.287        *
*****
* TENS     *           -4.235        *
*****
* SCREEN   *           7.695         *
*****
* VEL-TEN  *           -4.660        *
*****
* VEL-SCRE *           -1.477        *
*****
* TEN-SCRE *           -3.515        *
*****
* V-T-S    *           -7.203        *
*****

```

TABELA VIII - Efeitos dos fatores e de suas interações sobre "m de Weibull".

```

*****
*          * VARIANCIA *
* EXPERIMENTO * por *
*          * EXPERIMENTO *
*****
*    1    *  99.611 *
*****
*    2    * 141.525 *
*****
*    3    * 552.130 *
*****
*    4    *  78.392 *
*****
*    5    * 597.068 *
*****
*    6    *  25.303 *
*****
*    7    * 1030.641 *
*****
*    8    *  304.120 *
*****

```

INTERVALO
16.261

TABELA IX - Variância por experimento e cálculo do intervalo de variação para 95% de confiança. Parâmetro "m de Weibull".

REPLICAÇÕES				
R1	R2	R3	MEDIAS	
4.847	4.876	4.859	4.861	Y1
4.875	4.820	4.801	4.832	Y2
4.863	4.925	4.875	4.888	Y3
4.894	4.883	4.852	4.876	Y4
4.878	4.930	4.872	4.893	Y5
4.882	4.888	4.867	4.879	Y6
4.913	4.866	4.897	4.892	Y7
4.963	4.857	4.889	4.903	Y8

TABELA X - Resultados dos valores de "So" obtidos dos ensaios para o delineamento Weibull.

```

*****
*           *   Efeito dos   *
*   EFEITO *   Fatores e suas *
*           *   Interações   *
*****
* VELOC    *           -0.011 *
*****
* TENS     *           0.024   *
*****
* SCREEN   *           0.028   *
*****
* VEL-TEN  *           0.011   *
*****
* VEL-SCRE *           0.009   *
*****
* TEN-SCRE *           -0.012  *
*****
* V-T-S    *           0.002   *
*****

```

TABELA XI - Efeitos dos fatores e de suas interações sobre "So de Weibull".

```

*****
*          * VARIANCIA *
* EXPERIMENTO * por *
*          * EXPERIMENTO *
*****
*      1      * 0.00021 *
*****
*      2      * 0.00147 *
*****
*      3      * 0.00108 *
*****
*      4      * 0.00047 *
*****
*      5      * 0.00101 *
*****
*      6      * 0.00011 *
*****
*      7      * 0.00057 *
*****
*      8      * 0.00295 *
*****

```

INTERVALO
0.0271

TABELA XII - Variância por experimento e cálculo do intervalo de variação para 95% de confiança. Parâmetro "So de Weibull".

REPLICAÇÕES			
R1	R2	MEDIAS	
26.399	33.394	29.8965	Y1
16.851	19.93	18.3905	Y2
22.888	29.709	26.2985	Y3
20.149	18.759	19.454	Y4
23.378	23.664	23.521	Y5
19.55	22.43	20.99	Y6
18.293	17.43	17.8615	Y7
18.702	24.167	21.4345	Y8

TABELA XIII - Resultados obtidos para "n" no delineamento de experimentos.

```

*****
*           *   Efeito dos   *
*   EFEITO *   Fatores e suas *
*           *   Interações   *
*****
* VELOC    *           -4.327 *
*****
* TENS     *           -1.937 *
*****
* SCREEN   *           -2.558 *
*****
* VEL-TEN  *           2.691  *
*****
* VEL-SCRE *           4.848  *
*****
* TEN-SCRE *           -0.67   *
*****
* V-T-S    *           0.361   *
*****

```

TABELA XIV - Efeitos dos fatores e de suas interações sobre "n".


```

*****
*           * VARIANCIA *
* EXPERIMENTO * por *
*           * EXPERIMENTO *
*****
*     1     * 24.465 *
*****
*     2     *  4.740 *
*****
*     3     * 23.263 *
*****
*     4     *  0.966 *
*****
*     5     *  0.041 *
*****
*     6     *  4.147 *
*****
*     7     *  0.372 *
*****
*     8     * 14.933 *
*****

```

INTERVALO
3.482

TABELA XV - Variância por experimento e cálculo do intervalo de variação para 95% de confiança. Parâmetro de Susceptibilidade "n".

					90% CONF
FONTE	SOMA QUAD	GL	QUAD MED	F CALC	F CRIT
VEL	517.4530	1	517.4530	1.464426	3.05 *
TEN	107.6113	1	107.6113	0.304547	3.05
SCRE	355.2781	1	355.2781	1.005460	3.05 *
VEL-TEN	130.2936	1	130.2936	0.368739	3.05
VEL-SCR	13.08326	1	13.08326	0.037026	3.05
TEN-SCR	74.13135	1	74.13135	0.209796	3.05
VE-TE-SC	311.3280	1	311.3280	0.881079	3.05
RESIDUAL	5653.576	16	353.3485		
TOTAL	7162.755	23	311.4241		

TABELA XVI - Análise de variancia para "m de Weibull".

TABELA DE VARIANCIAS

***** ** *****

FONTE	SOMA QUAD	GL	QUA MED	F CALC	F CRIT
VELOC	0.000704	1	0.000704	0.712508	4.49
TENSAO	0.003313	1	0.003313	3.352755	4.49
SCREEN	0.004592	1	0.004592	4.647076	4.49
VEL-TEN	0.000682	1	0.000682	0.690754	4.49
VEL-SCRE	0.000504	1	0.000504	0.510139	4.49
TEN-SCRE	0.000888	1	0.000888	0.898688	4.49
VE-TE-SC	0.000024	1	0.000024	0.024284	4.49
RESIDUO	0.015812	16	0.000988		
TOTAL	0.026522	23	0.001153		

*
*

TABELA XVII - Análise de variância para "So de Weibull".

					95% CONF
FONTE	SOMA QUAD	GL	QUA MED	F CALC	F CRITIC
VEL	74.896	1	74.896	8.216	5.32 *
TEN	15.014	1	15.014	1.647	5.32
SCRE	26.176	1	26.176	2.871	5.32
VEL-TEN	28.974	1	28.974	3.170	5.32
VEL-SCR	94.017	1	94.017	10.313	5.32 *
TEN-SCR	1.796	1	1.796	0.197	5.32
VE-TE-SC	0.520	1	0.520	0.057	5.32
RESIDUAL	72.928	8	9.116		
TOTAL	314.321	15	20.955		

VELOCIDADE E VELOCIDADE TIPO
DE TESTE SAO SIGNIFICATIVOS PARA
VALORES DE "N".

TABELA XVIII - Análise de variância para "n"

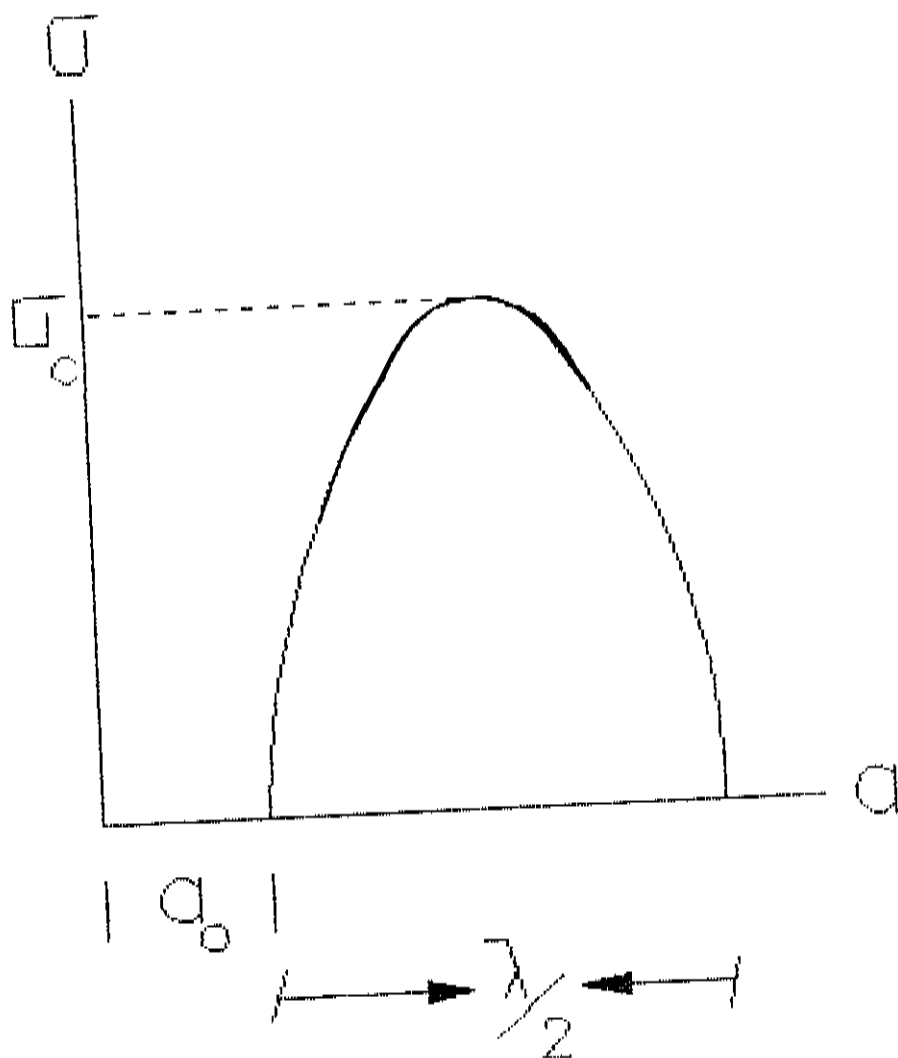


FIGURA 1 – Tensão para separar planos.
 a_0 posição de equilíbrio.

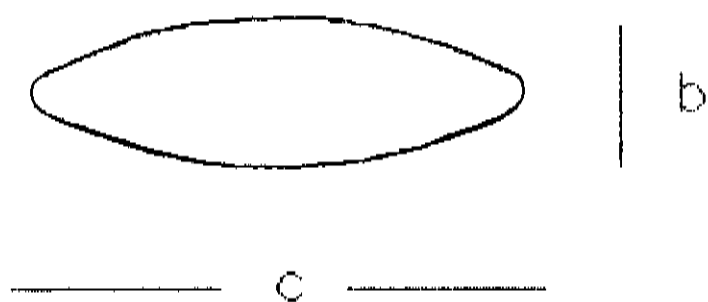


FIGURA 2 — Trinca elíptica no interior ou na superfície do material.

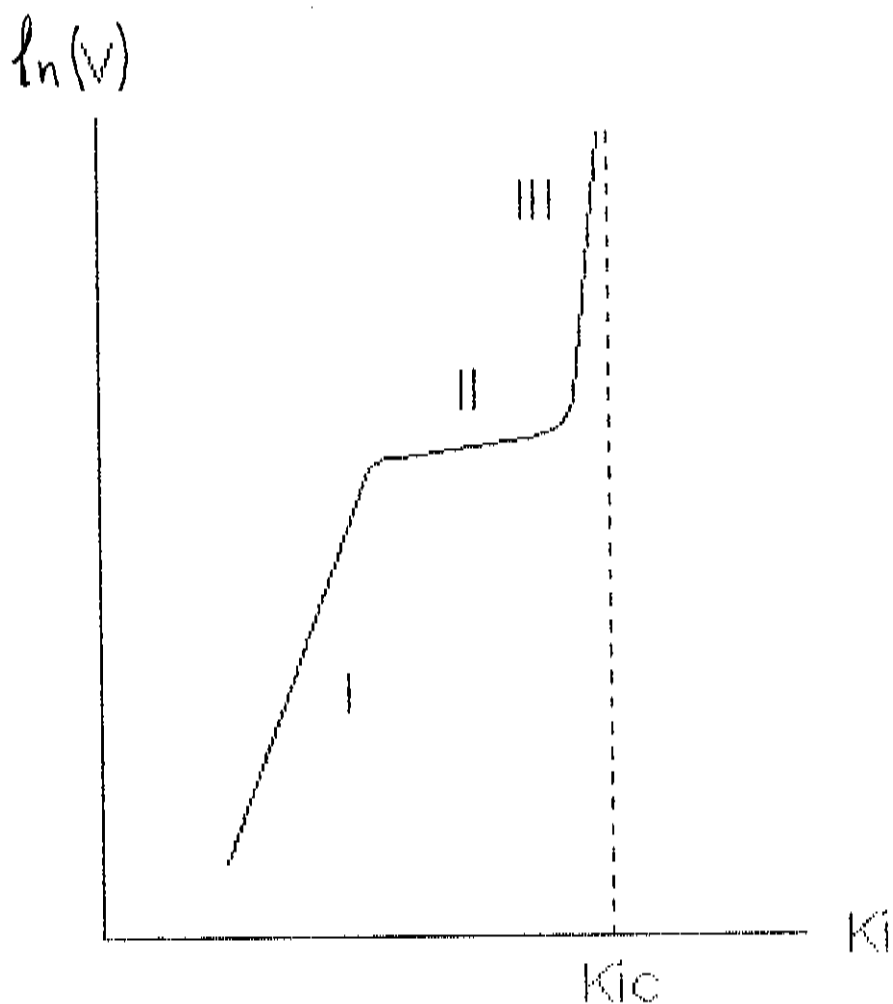


FIGURA 3 – Curva de velocidade versus fator de intensidade de tensão para materiais vitreos (corrosão).

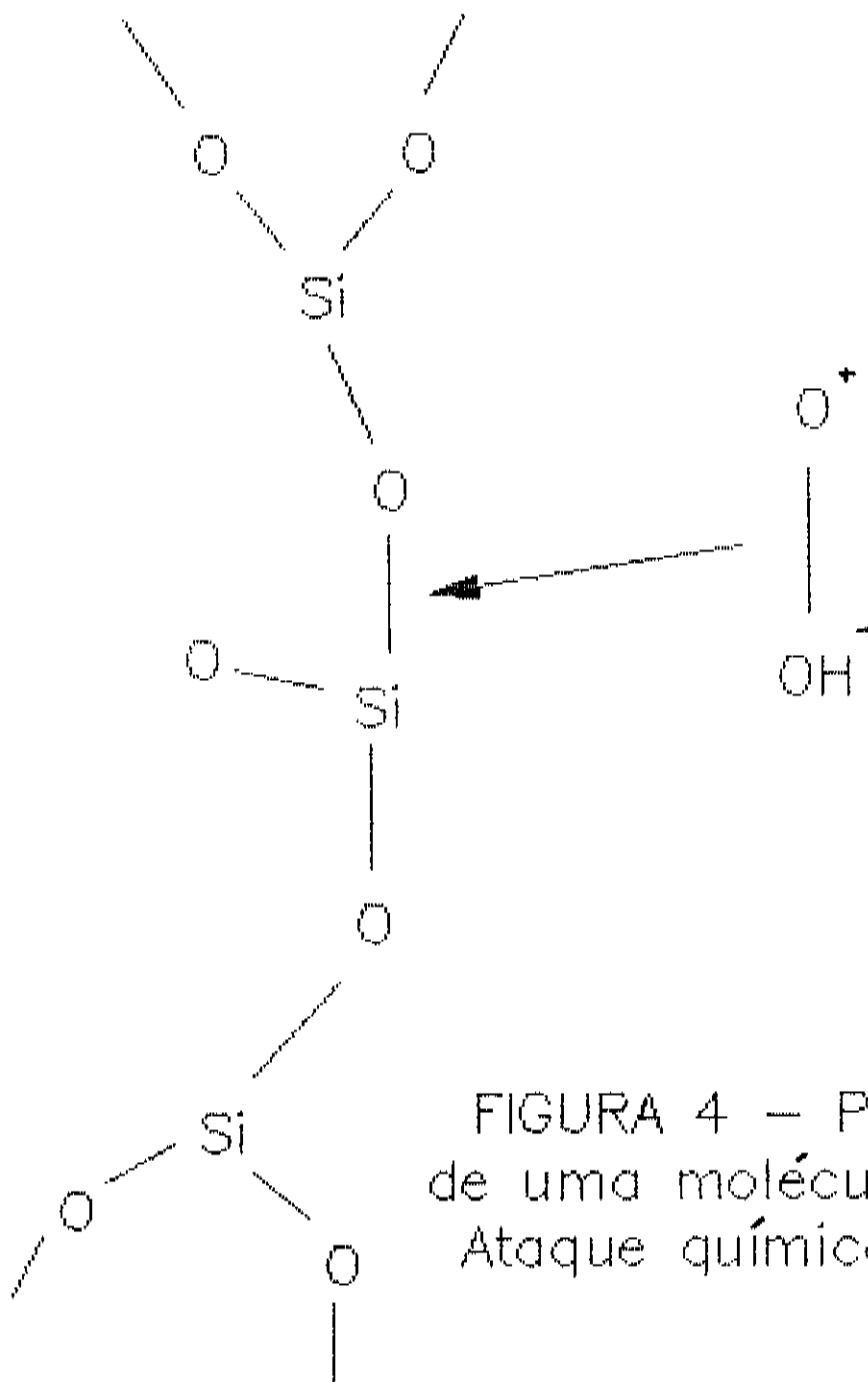


FIGURA 4 – Proximidade de uma molécula de água. Ataque químico.

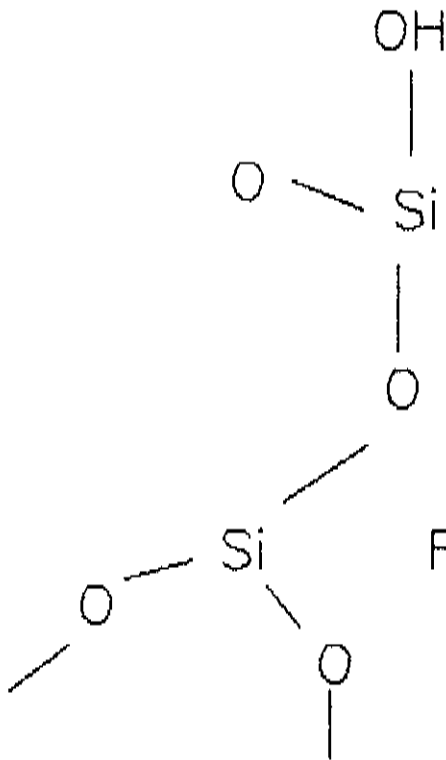
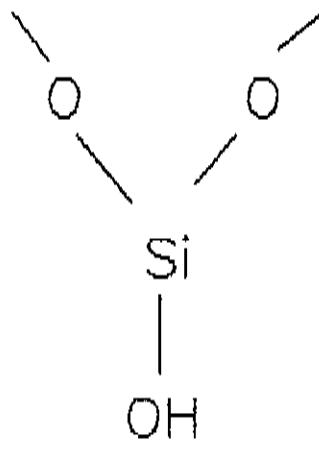


FIGURA 5 – Rompimento de ligação.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L-F}\right)\right]$$

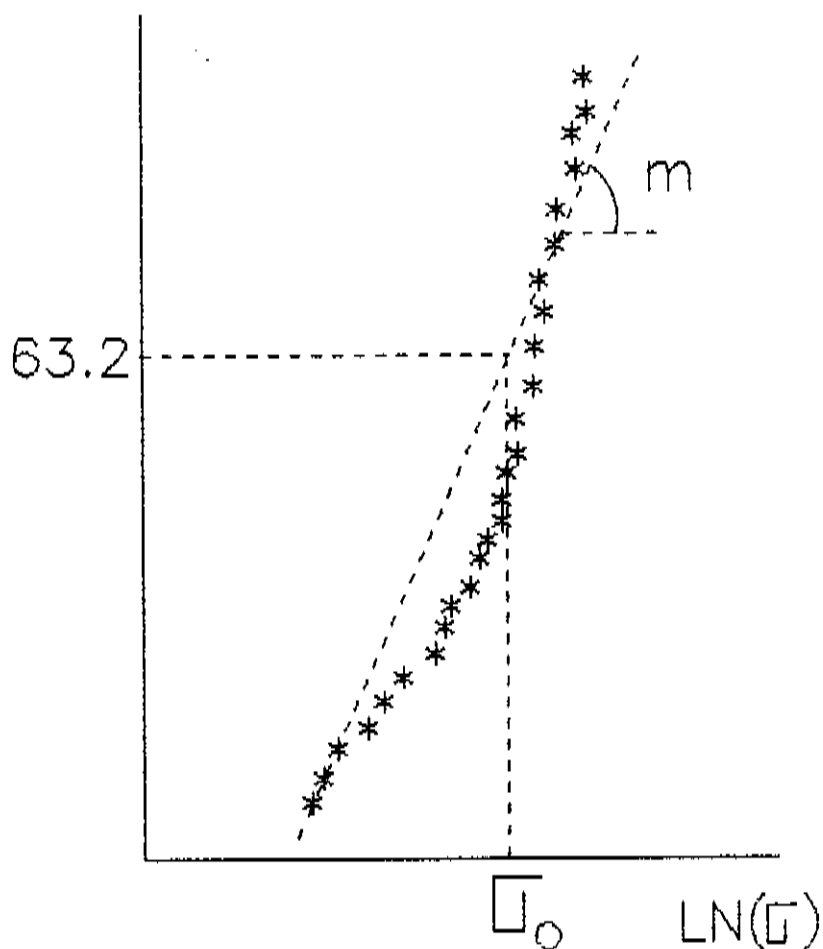


FIGURA 6 — Reta de Weibull
estimada por mínimos quadrados.
 $m = 15.34$ $\sigma_0 = 3.56$.

$\ln \sigma_0$ (GPa)

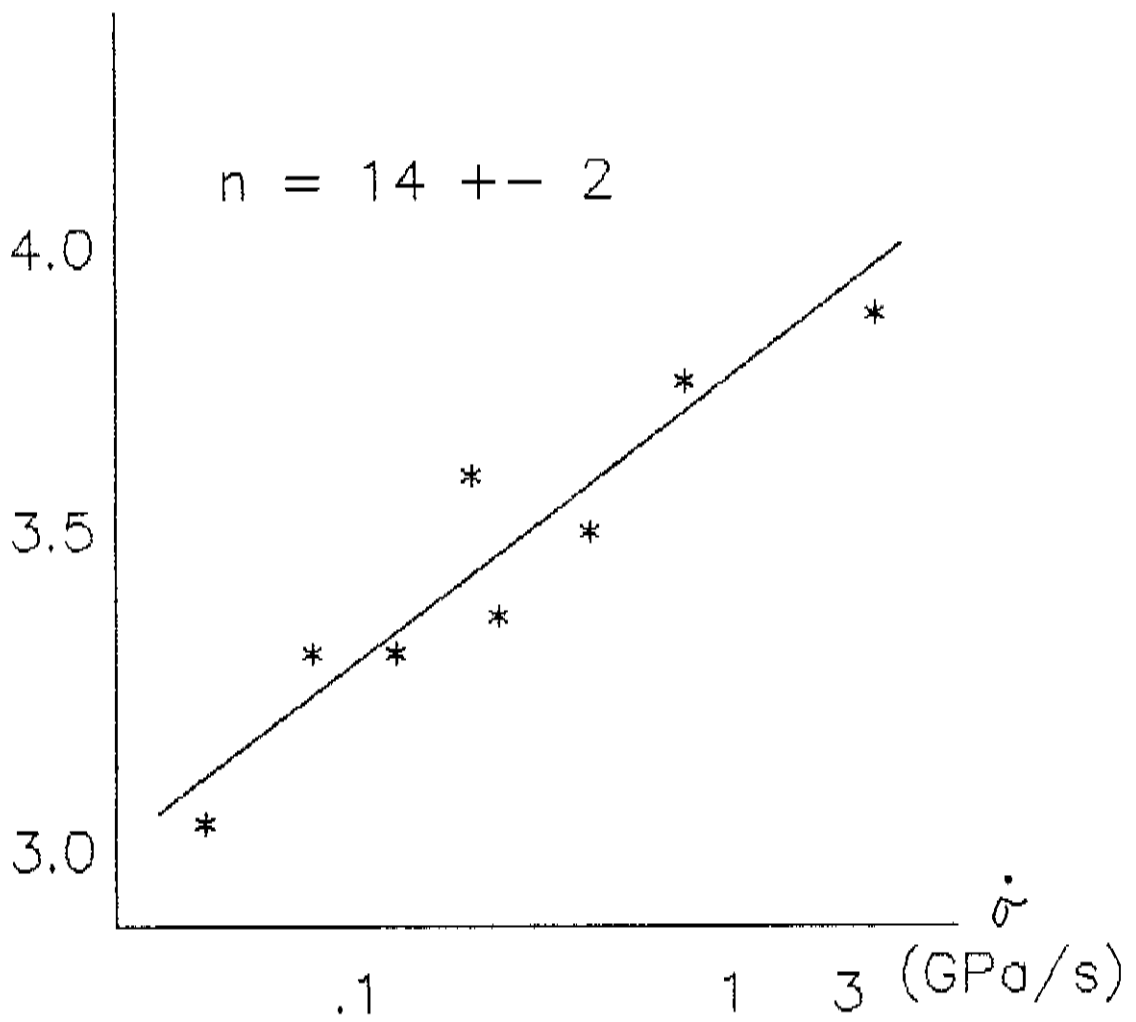


FIGURA 7 – Determinação de "n", parâmetro de susceptibilidade a fadiga.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L-F}\right)\right]$$

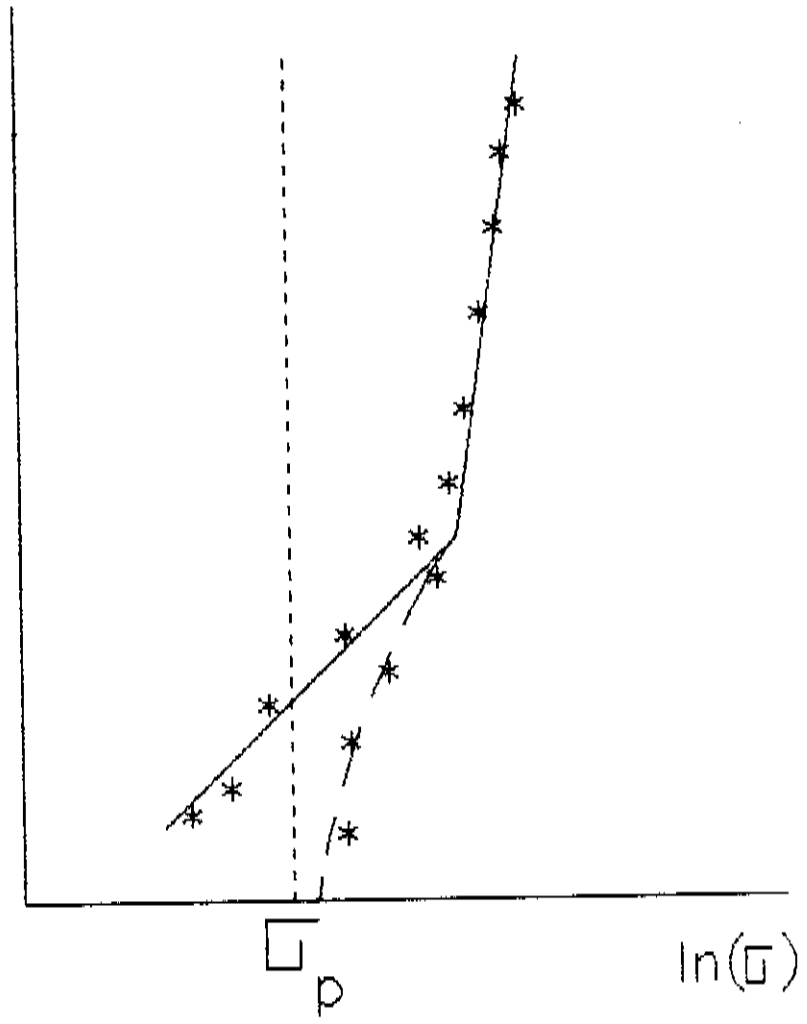


FIGURA 8 - Truncagem da curva de Weibull ao nível do teste de prova. --- → após o teste de prova.

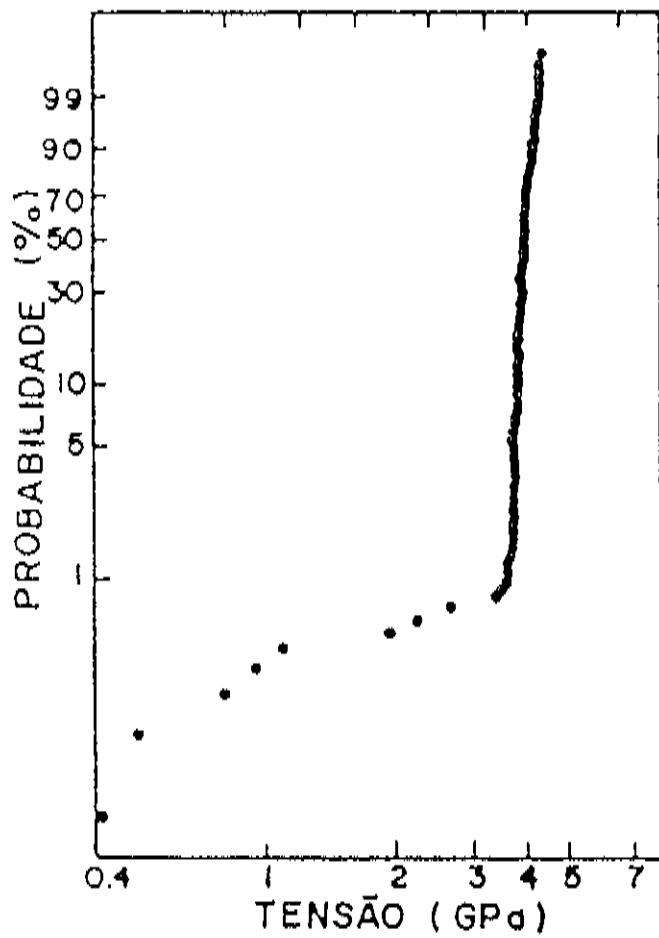


FIGURA 9 — Diagrama de Weibull para 1023 ensaios.

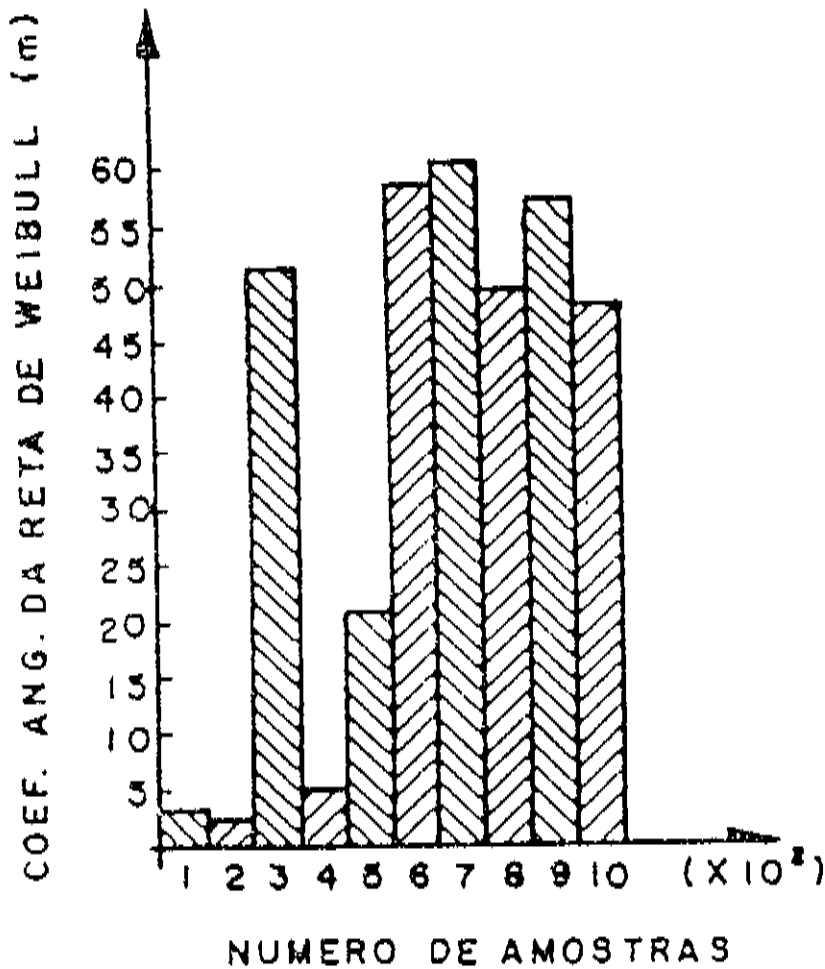


FIGURA 10 — Histograma mostrando os valores de "m" ao longo da fibra (lotes de 100 amostras).

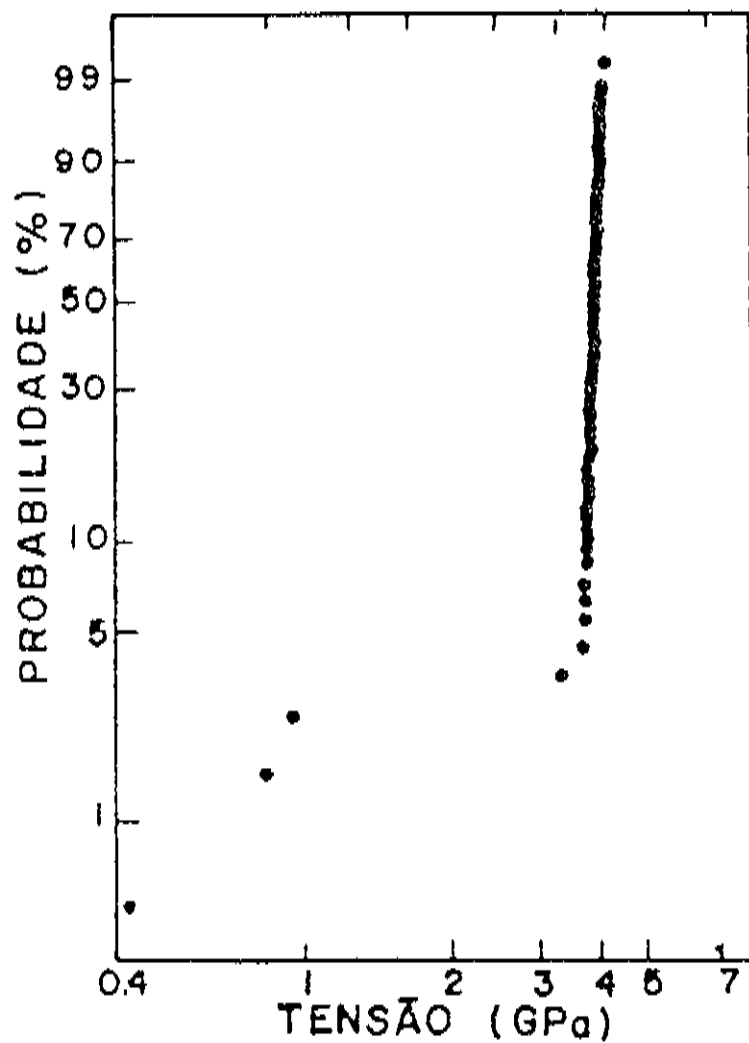


FIGURA 11 — Diagrama de Weibull característico para os 500 dados iniciais.

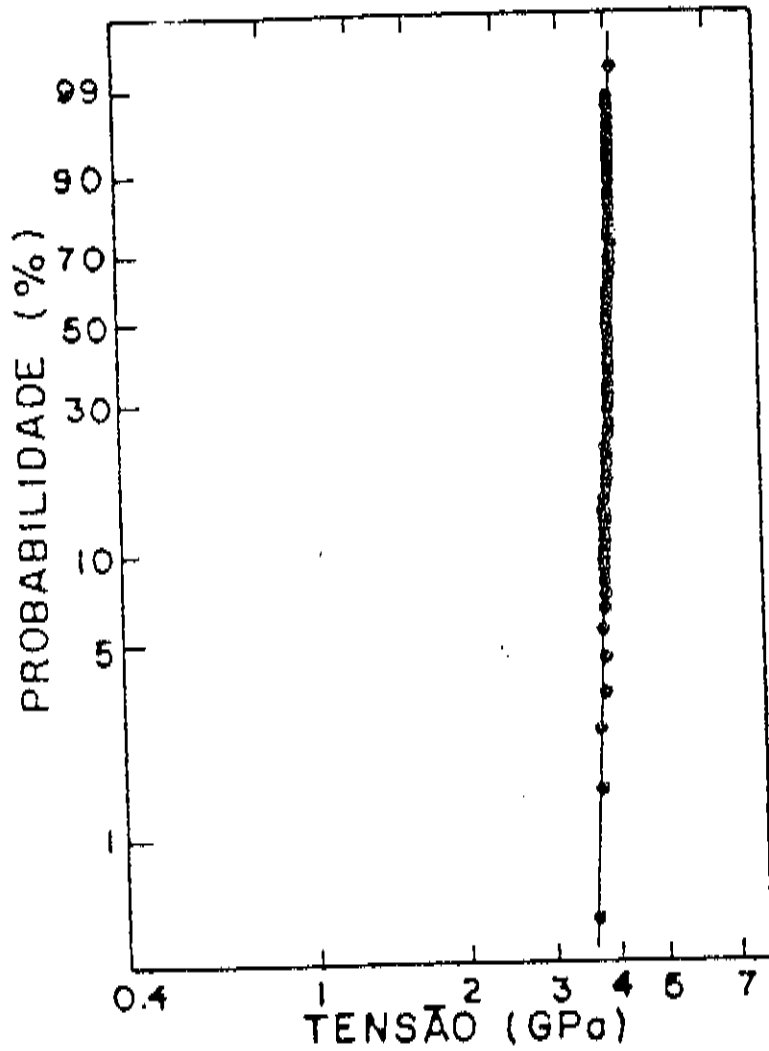


FIGURA 12 — Diagrama de Weibull característico para os 500 dados finais.

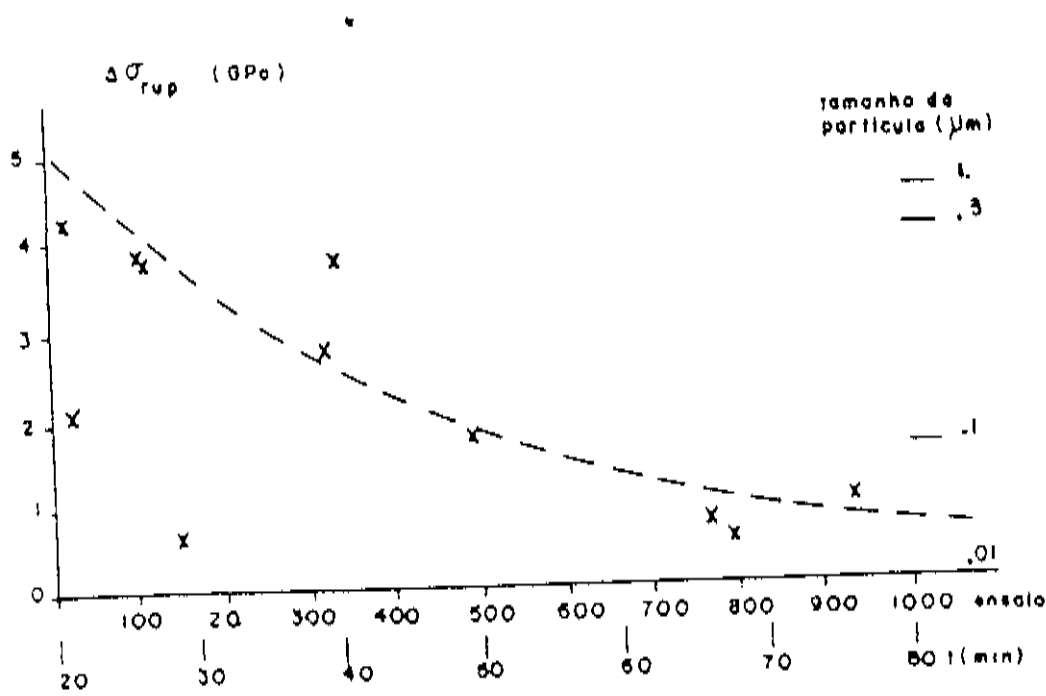


FIGURA 13 – Redução da tensão de ruptura devido a inclusão de partículas versus tempo de puxamento.

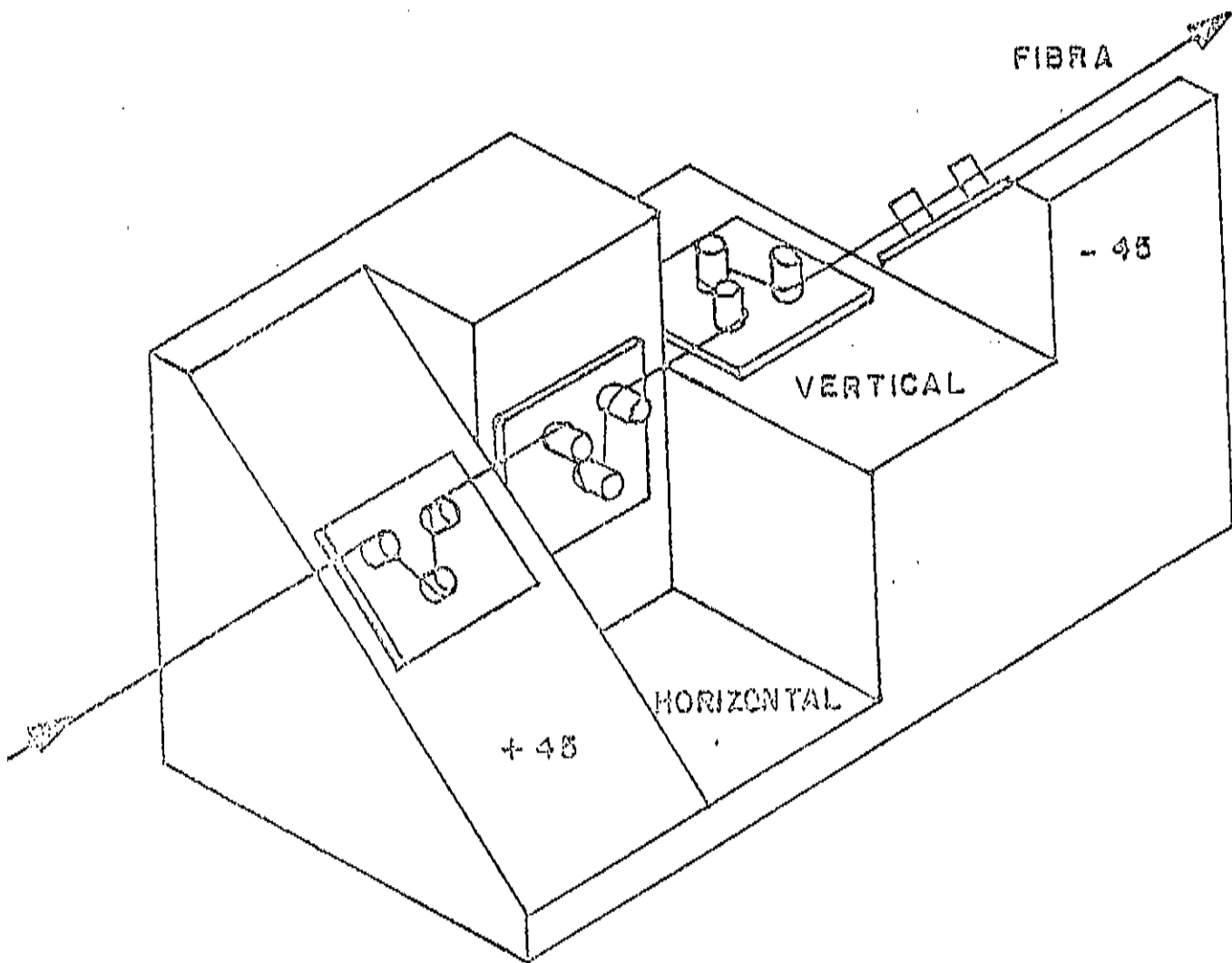


FIGURA 14 – Esquema de um teste de prova mecânica de roletes (flexão).

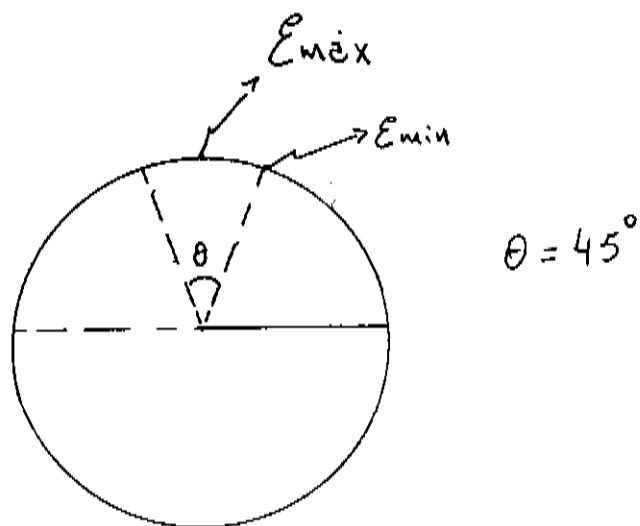


FIGURA 15 — Alongamento máximo da fibra sob flexão, VISTA DE FRENTE.

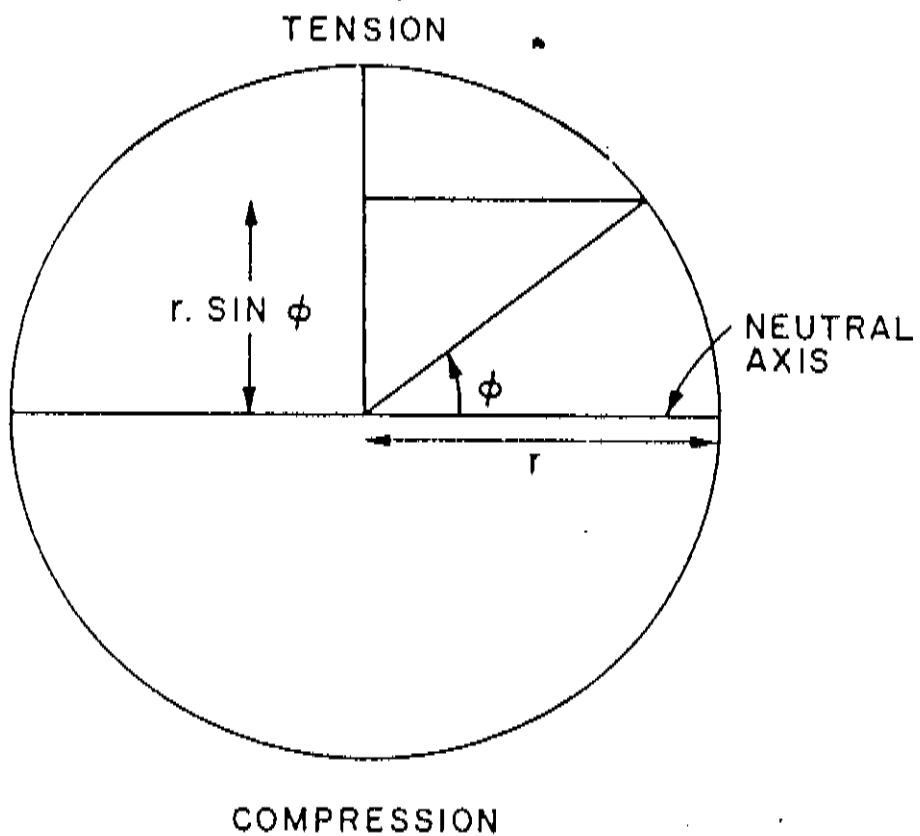


FIGURA 16 – Fibra sob flexão vista de frente.

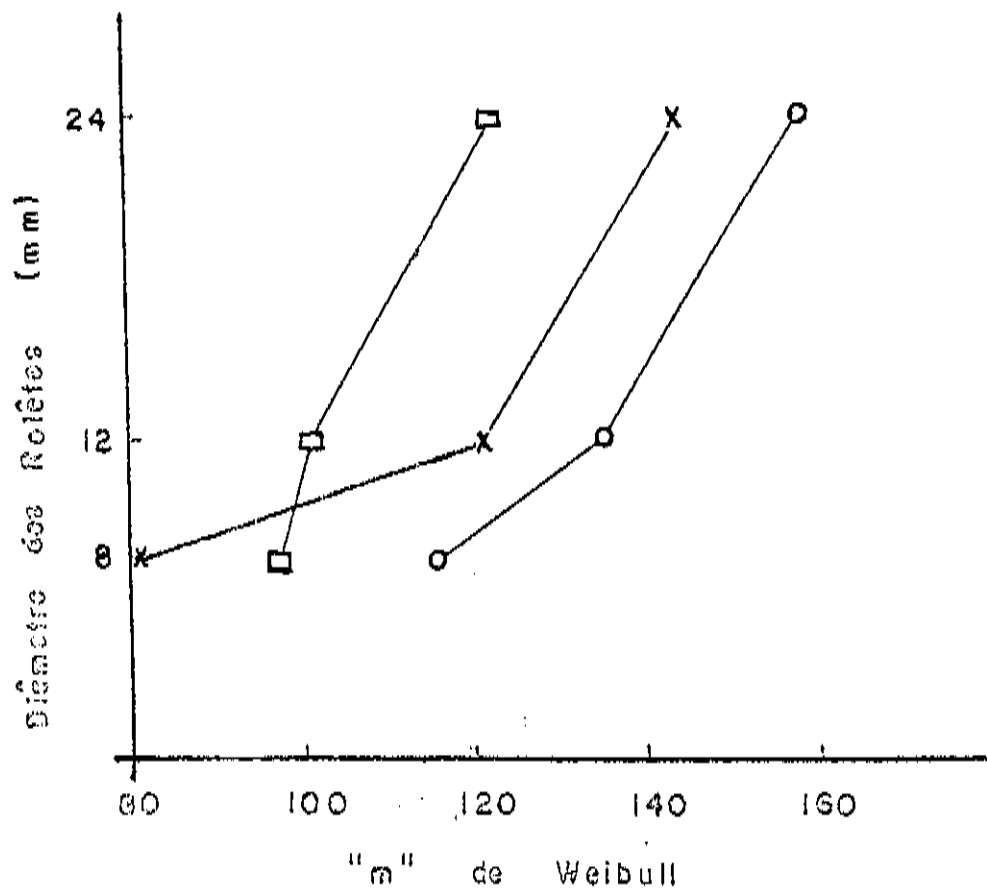


FIGURA 17 – Parâmetros de Weibull versus diâmetro de roletas para velocidades de ensaio.

- O – 80m/min
- X – 40 m/min
- – 20 m/min

TESTE DE PROVA DE TRAÇÃO

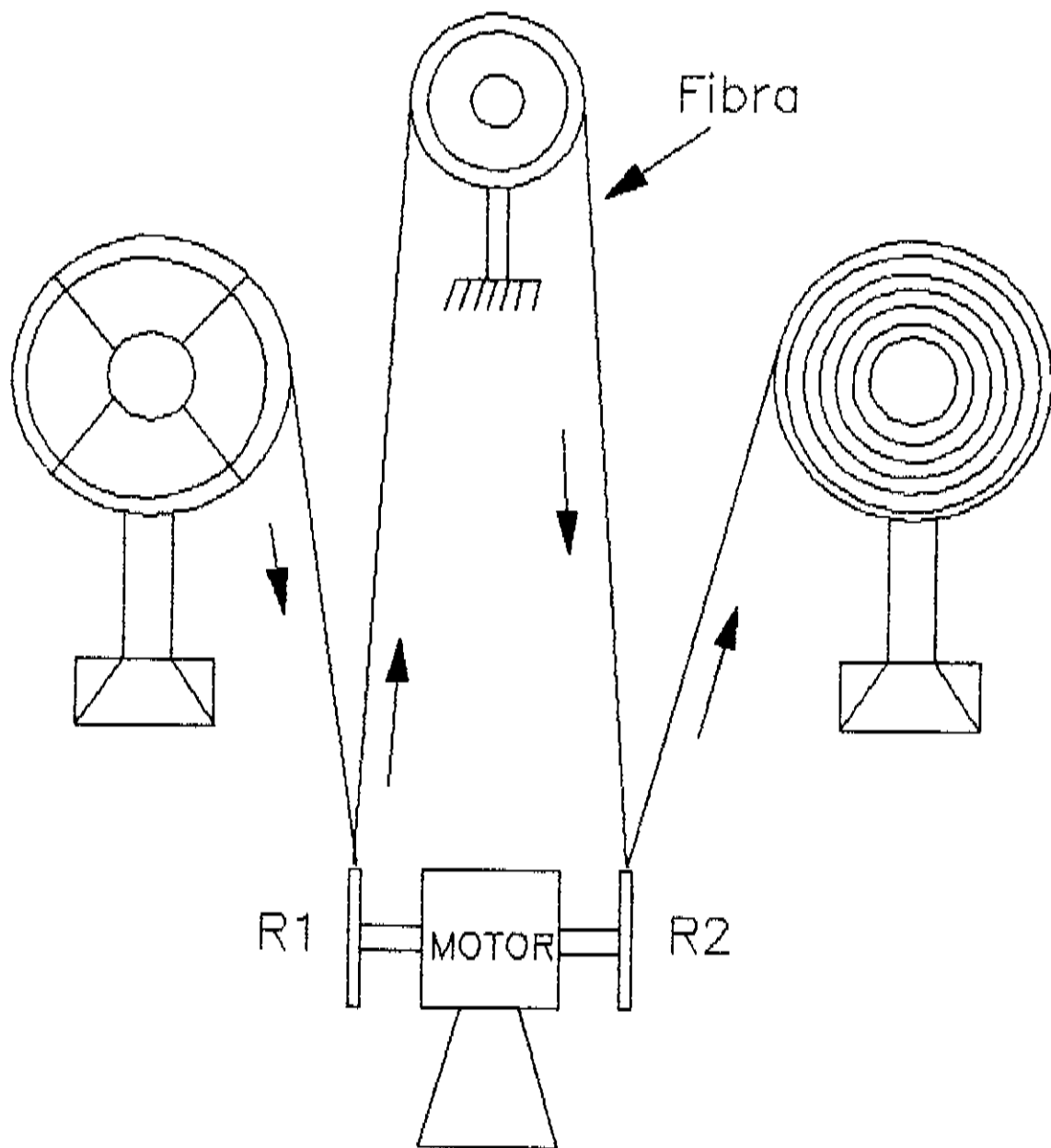


FIGURA 18

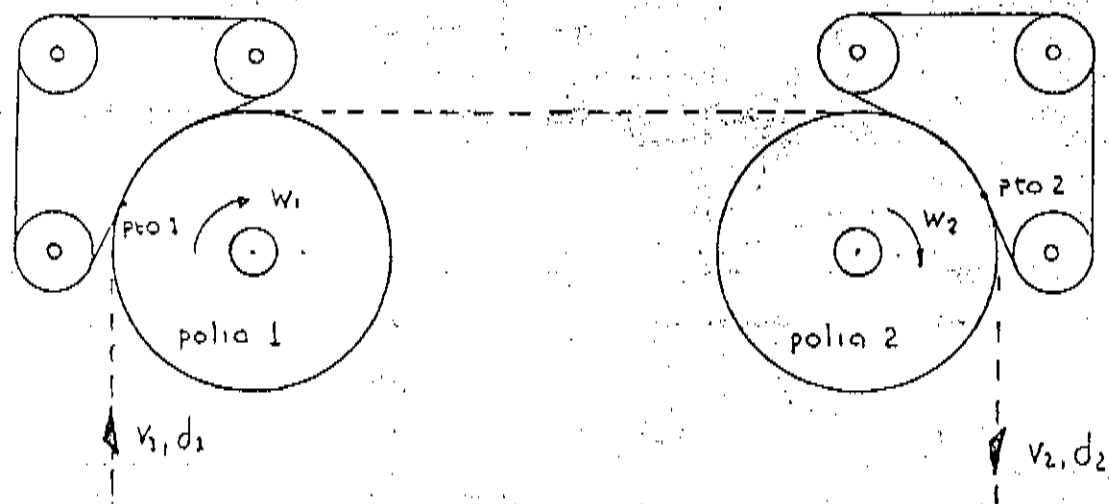


FIGURA 19 — Esquema de funcionamento do teste de prova de tração.

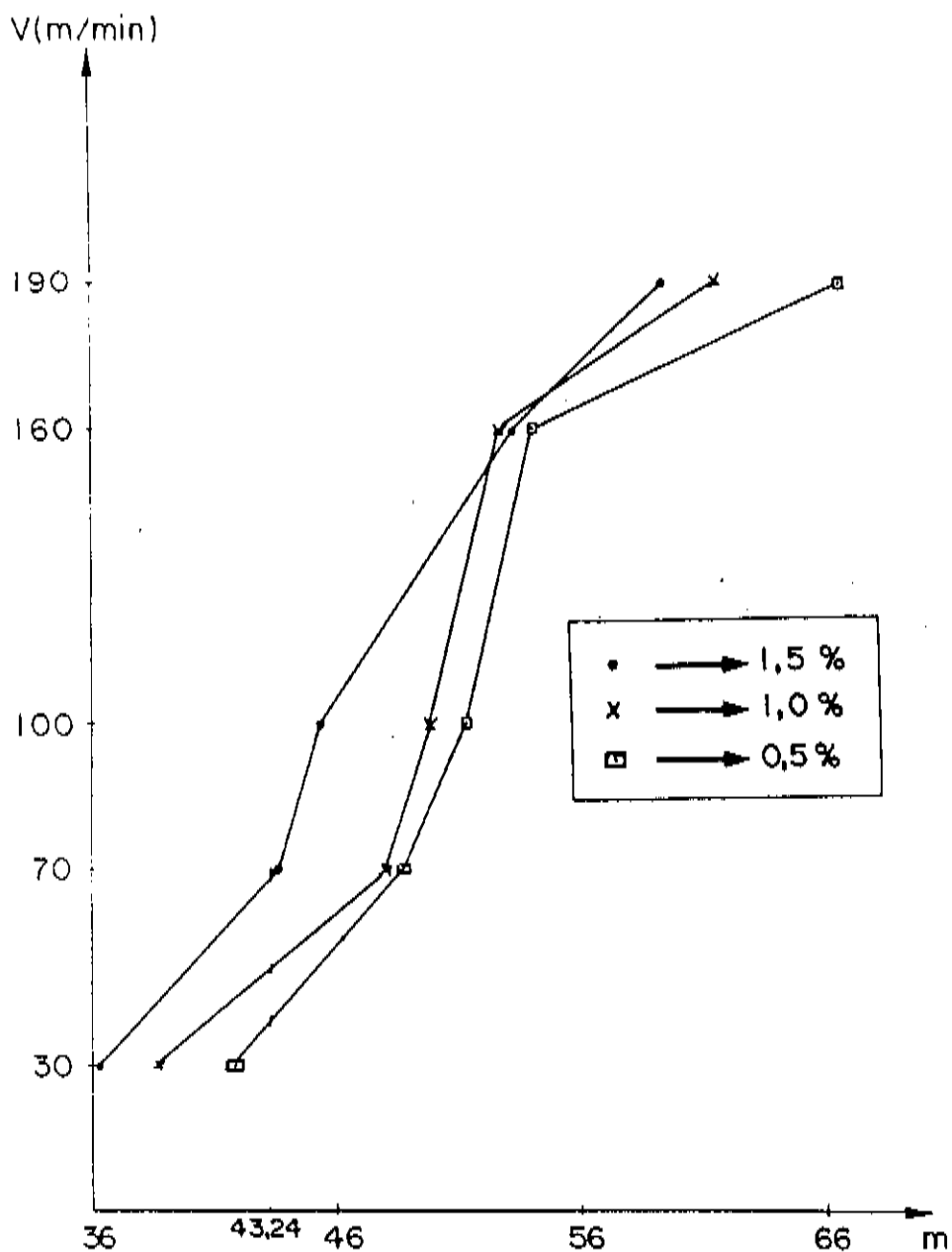


FIGURA 20 – Parâmetros "m" de Weibull versus velocidade de ensaio para cada alongamento.

INTERACAO VEL-TENS

PARAM WEIBULL "M"

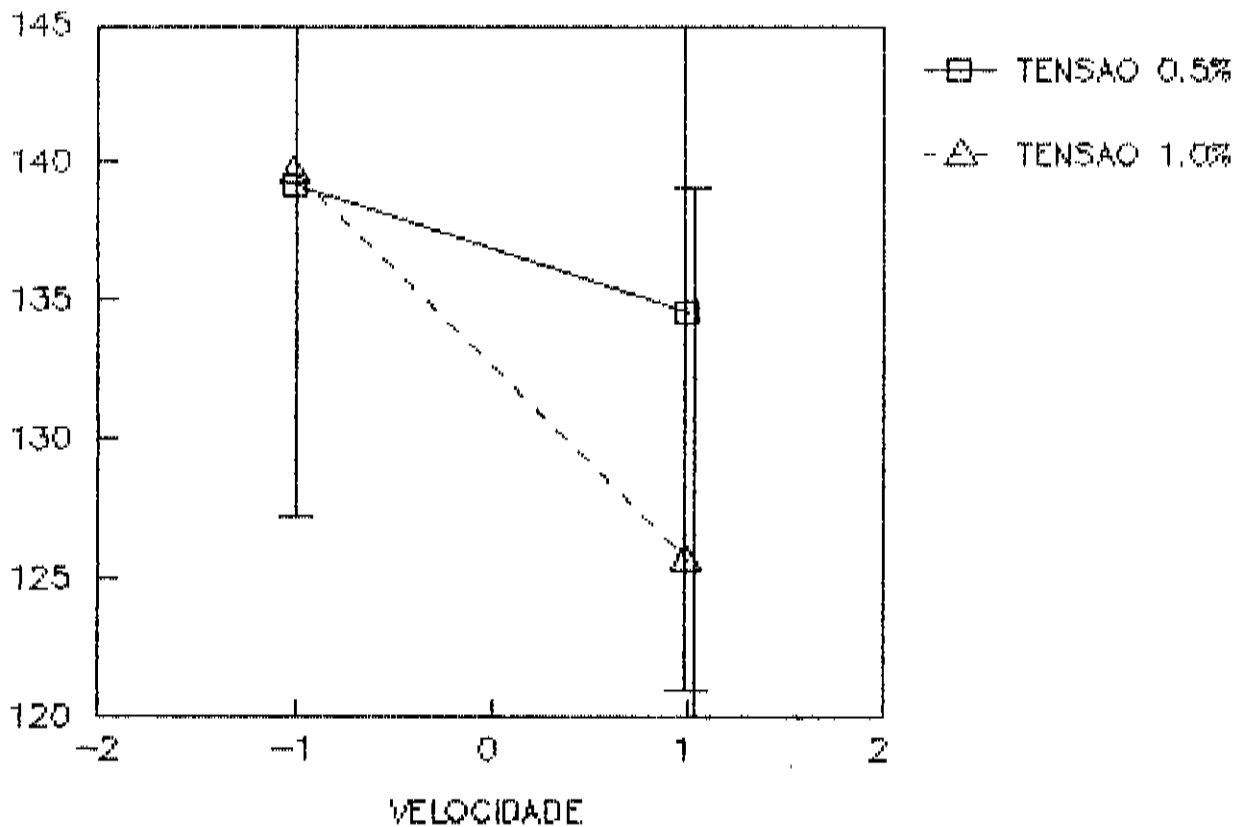


FIGURA 21 – Interação vel-ten com intervalo de confiança.

INTERACAO VELOCIDADE-TESTE

PARAM WEIBULL "M"

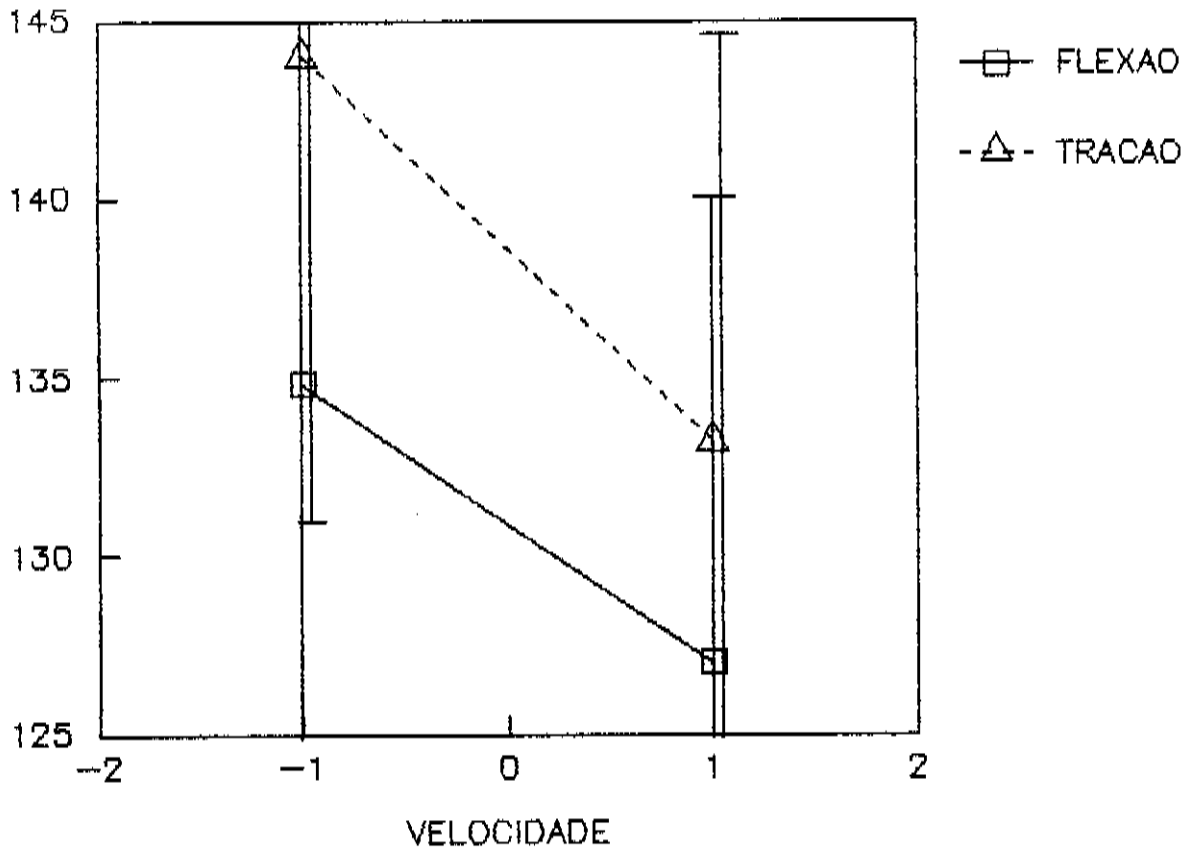


FIGURA 22 – Interação vel–scre com intervalo de confiança.

INTERAÇÃO TENSÃO-TESTE

PARAM WEIBULL "M"

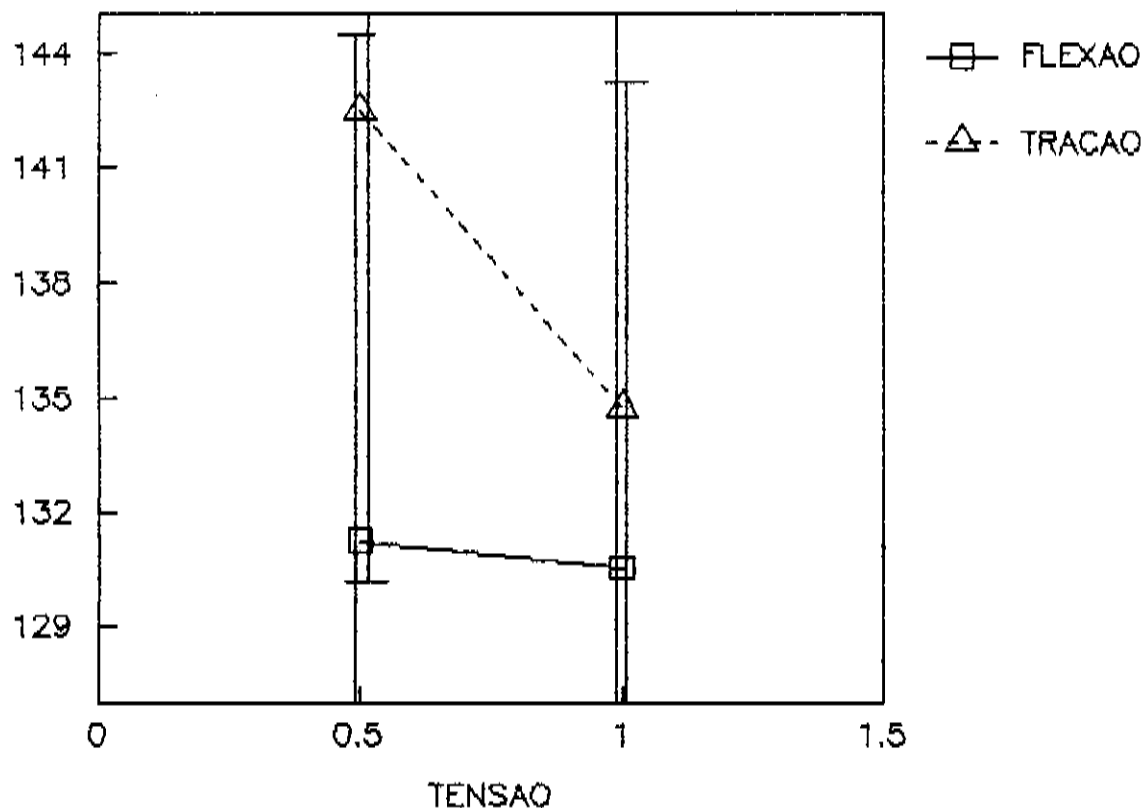


FIGURA 23 – Interação tensão–tipo teste. Com intervalo de variação.

INTERACAO VEL-TEN-RES TESTE FLEXAO

PARAM WEIBULL "M"

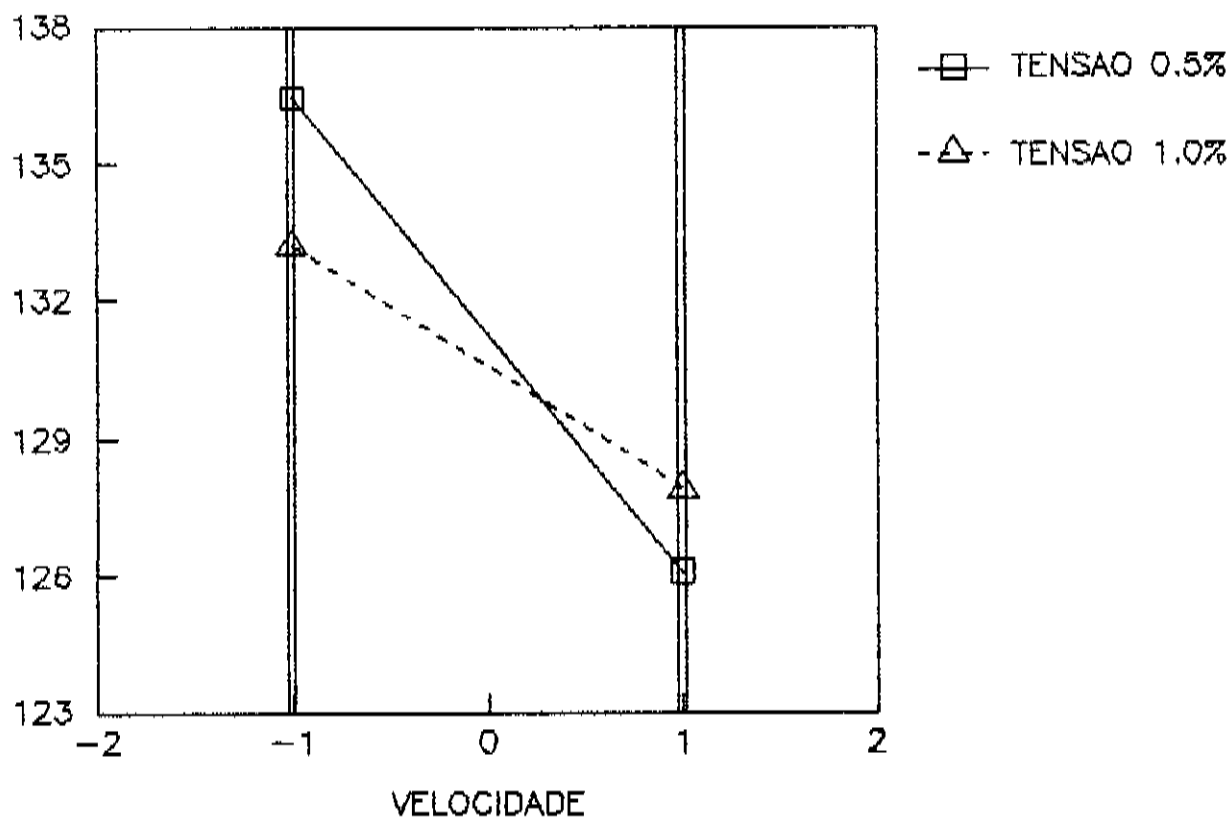


FIGURA 24 – Interação tripla com intervalo de confiança.

INTERACAO VEL-TEN-TES

TESTE TRACAO

PARAM WEIBULL "M"

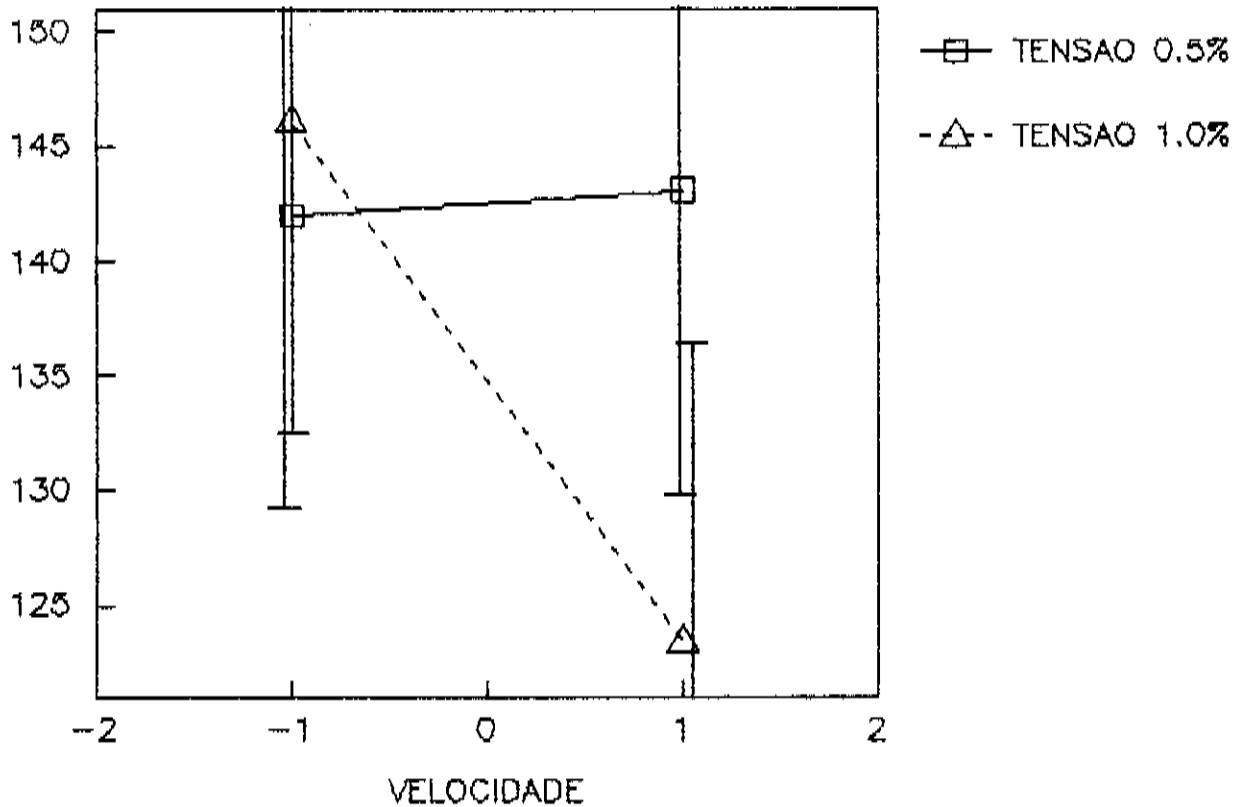


FIGURA 25 – Interação tripla com intervalo de confiança.

INTERACAO VEL-TEN

TEN GPa

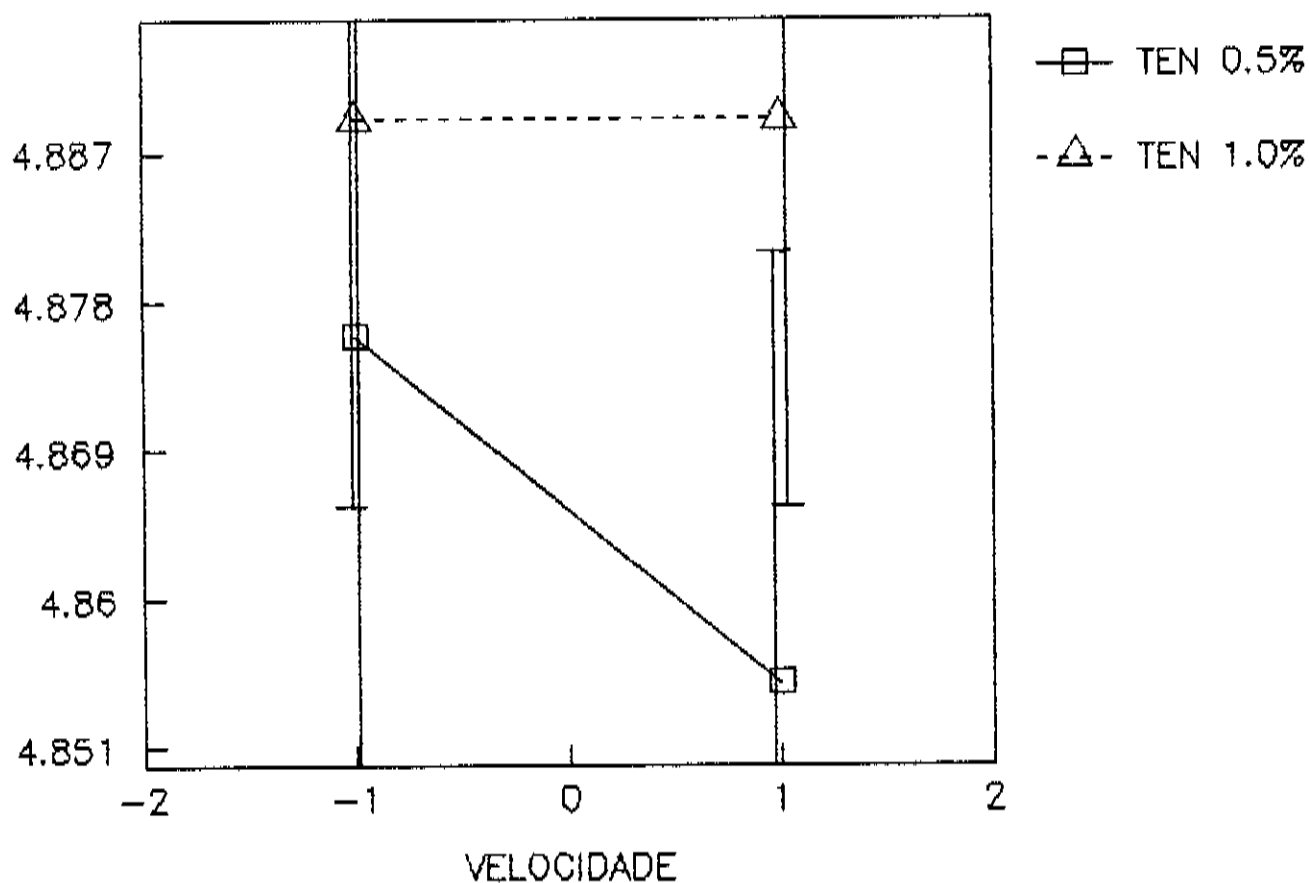


FIGURA 26 – Interação vel-ten com intervalo de confiança.

INTERACAO VEL - TIPO TESTE

TEN GPa

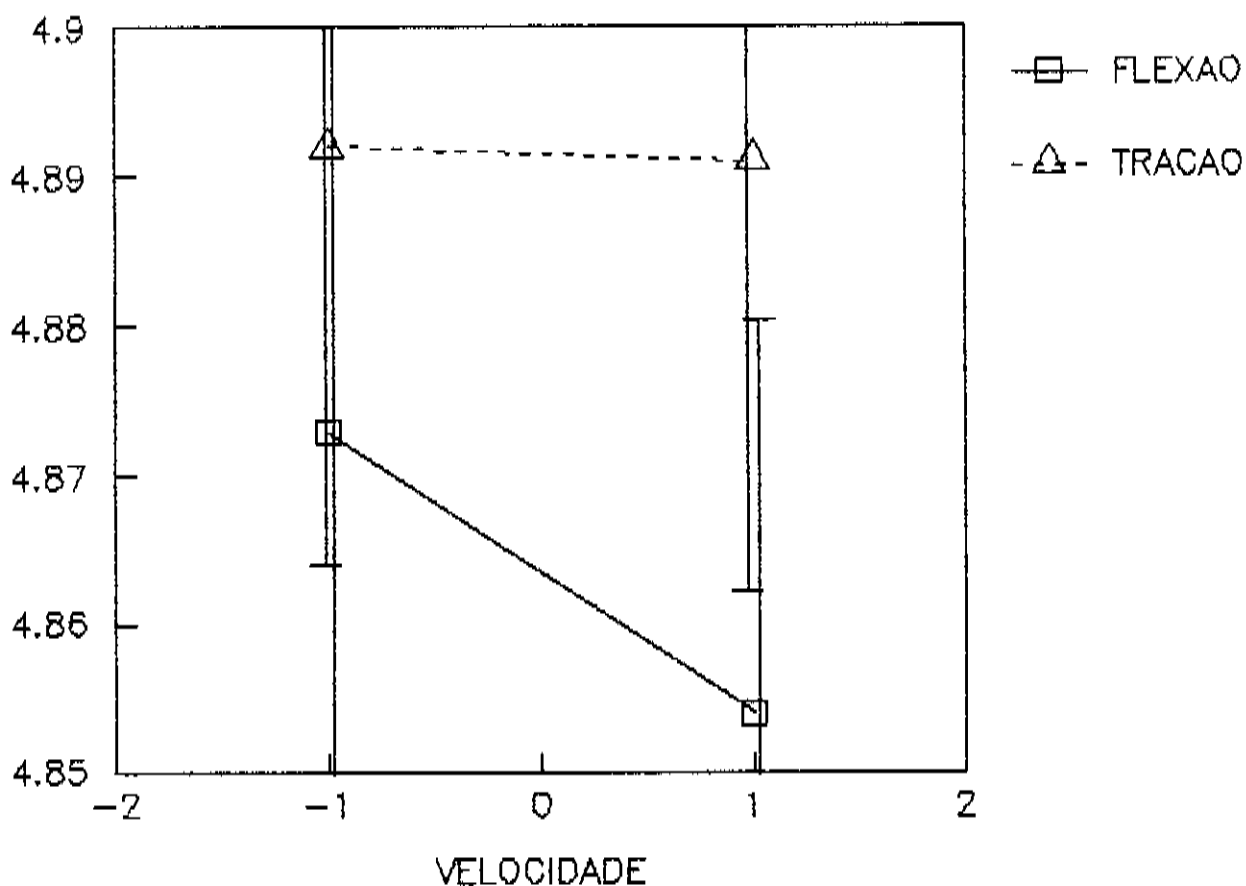


FIGURA 27 - Interação vel-scr.
Com intervalo de variação.

INTERACAO TEN - TIPO TESTE

TEN GPa

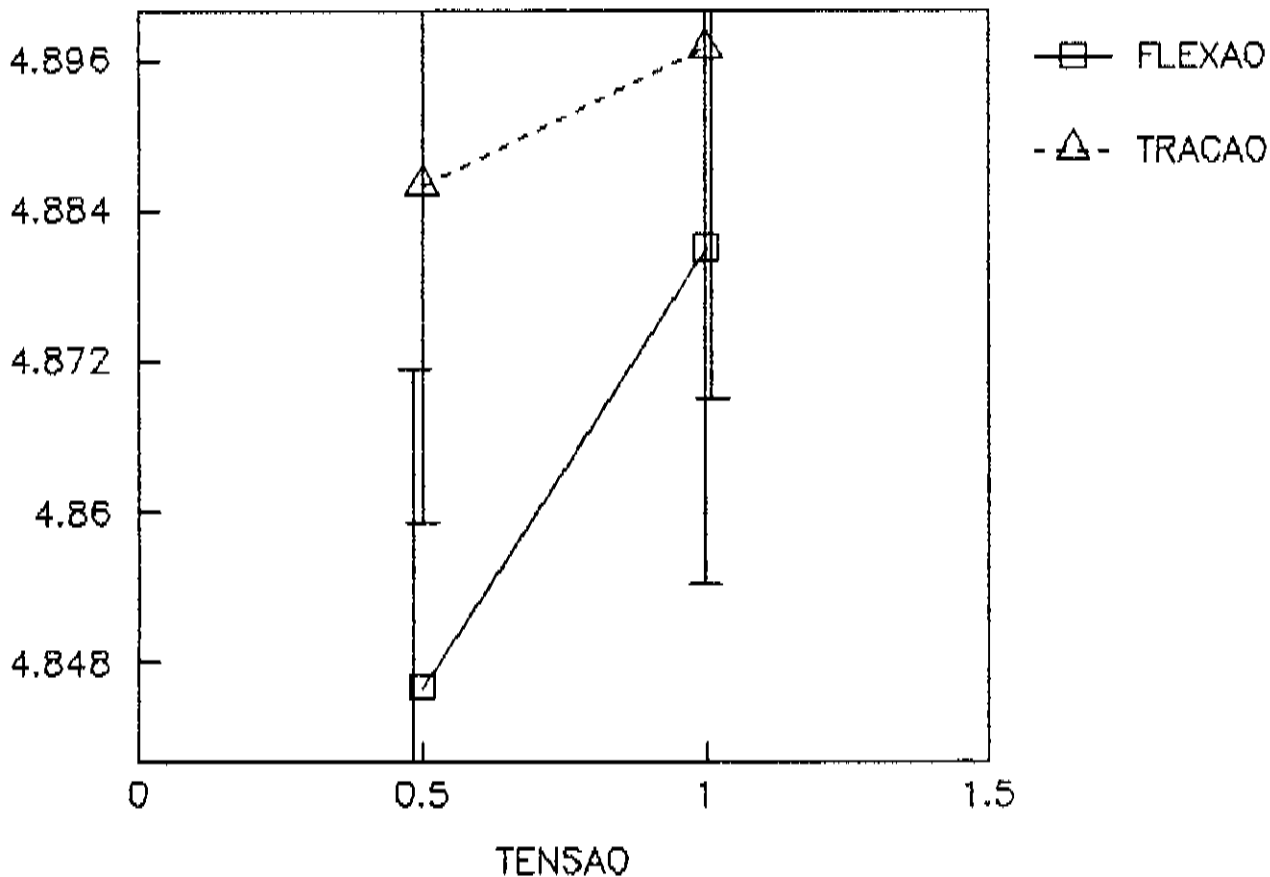


FIGURA 28 – Interação ten–tipo teste com intervalo de variação.

INTERACAO VEL-TEN-TESTE FLEXAO

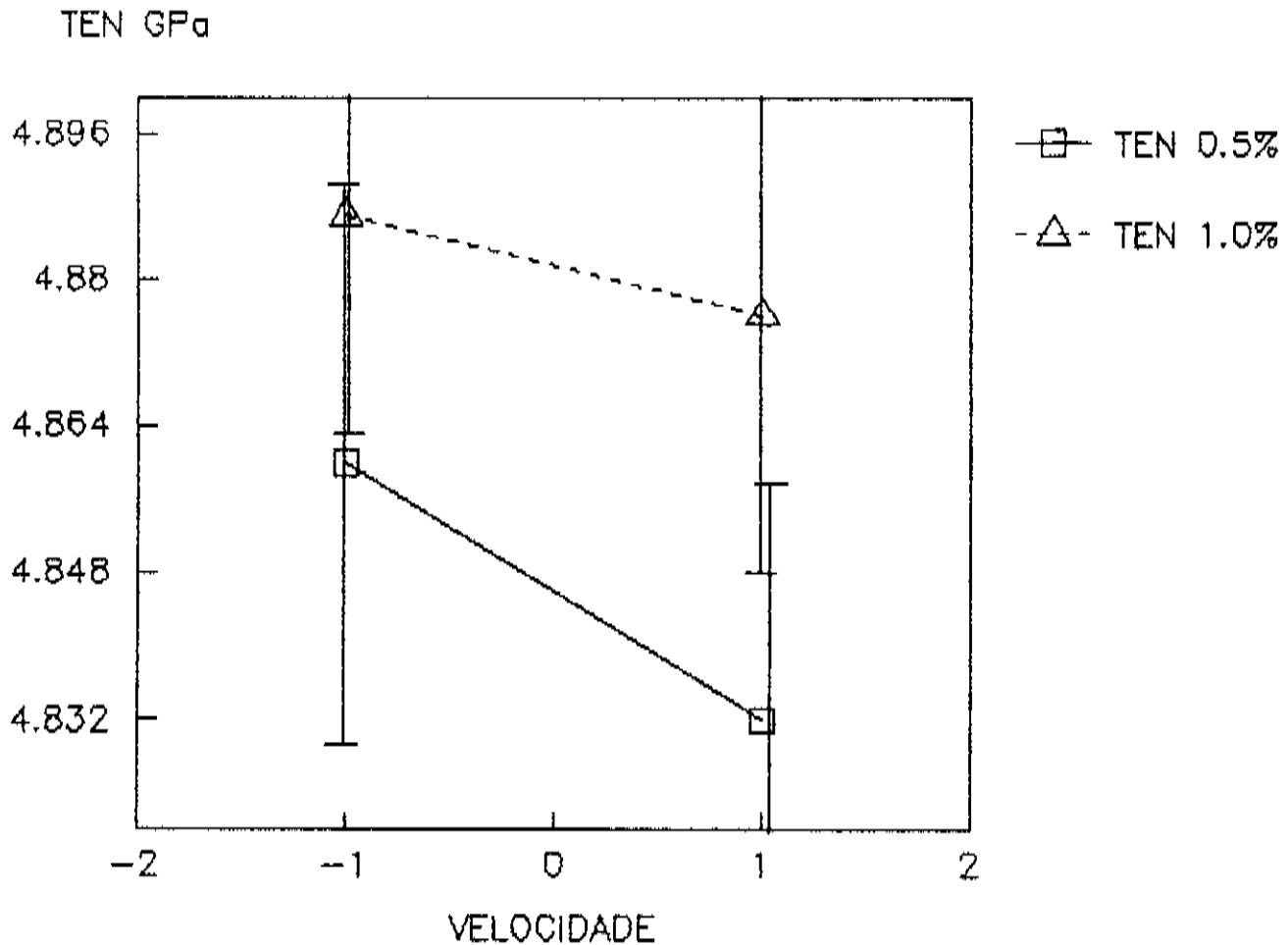


FIGURA 29 – Interação tripla, flexão.
Com intervalo de variação.

INTERACAO VEL-TEN-TESTE TRACAO

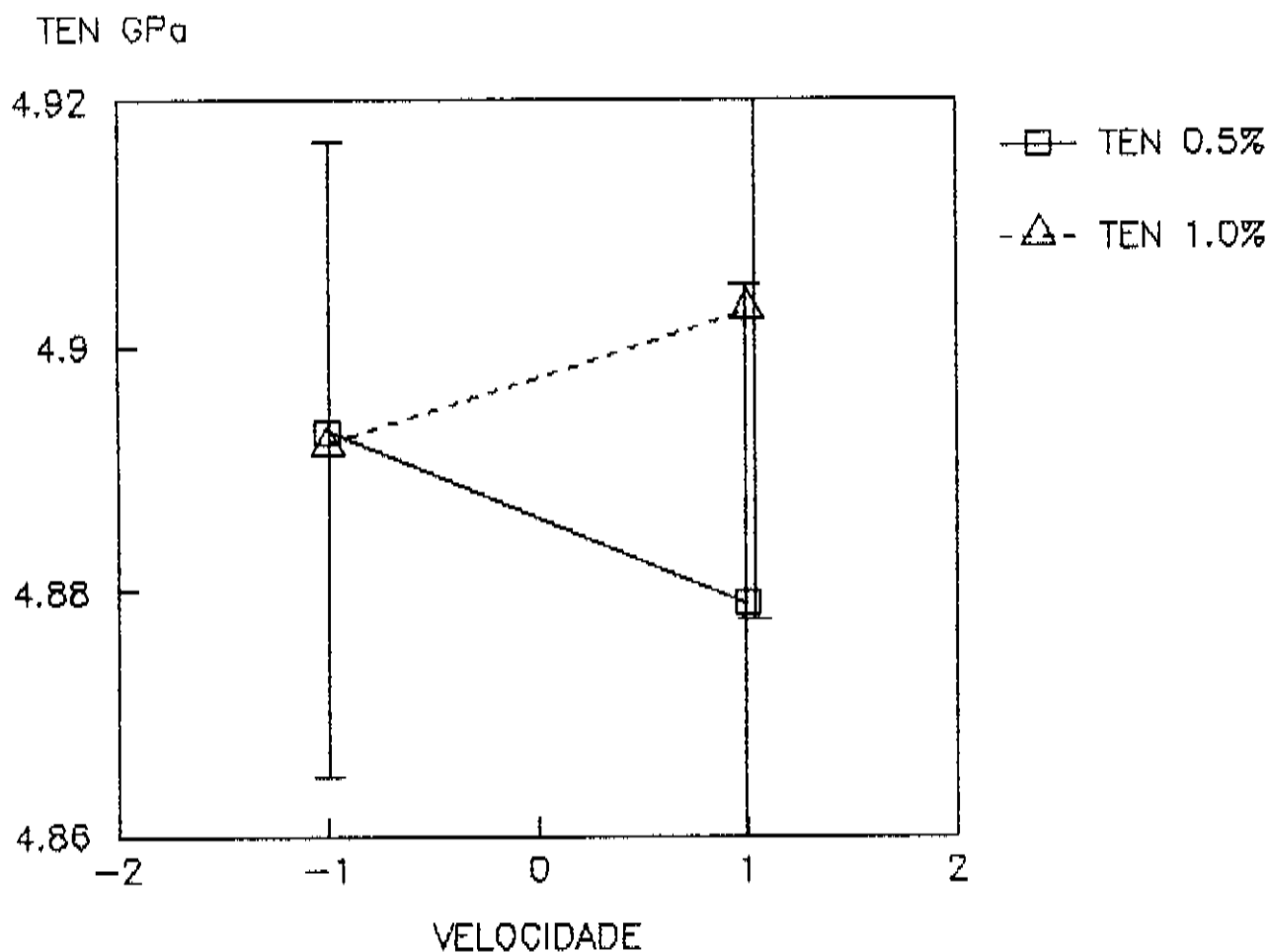


FIGURA 30 – Interação tripla, tração.
Com intervalo de confiança.

INTERACAO VELOCIDADE-TENSAO

PARAM SUSCEP N

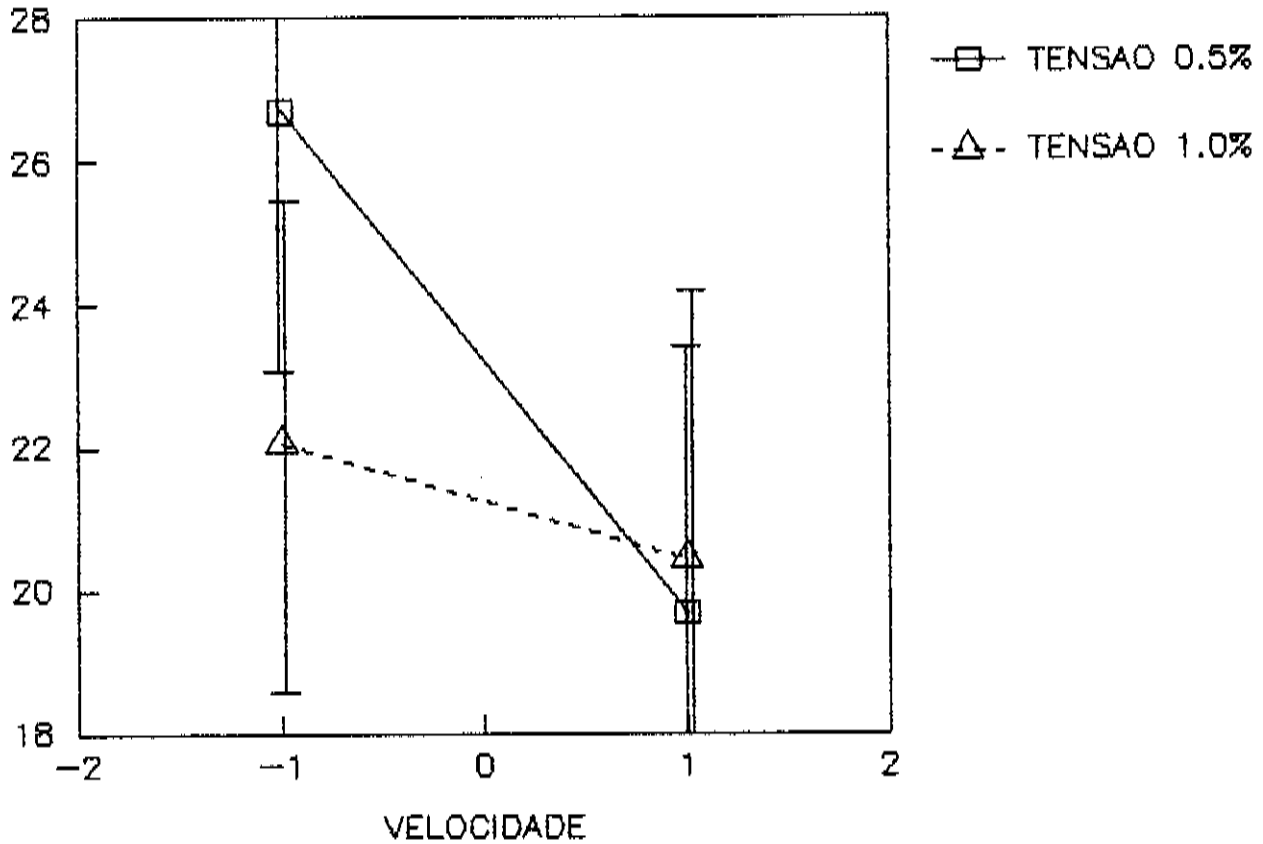


FIGURA 31 – Interação vel–ten com intervalo de variação.

INTERACAO VELOCIDADE-TIPO TESTE

PARAM SUSCEP N

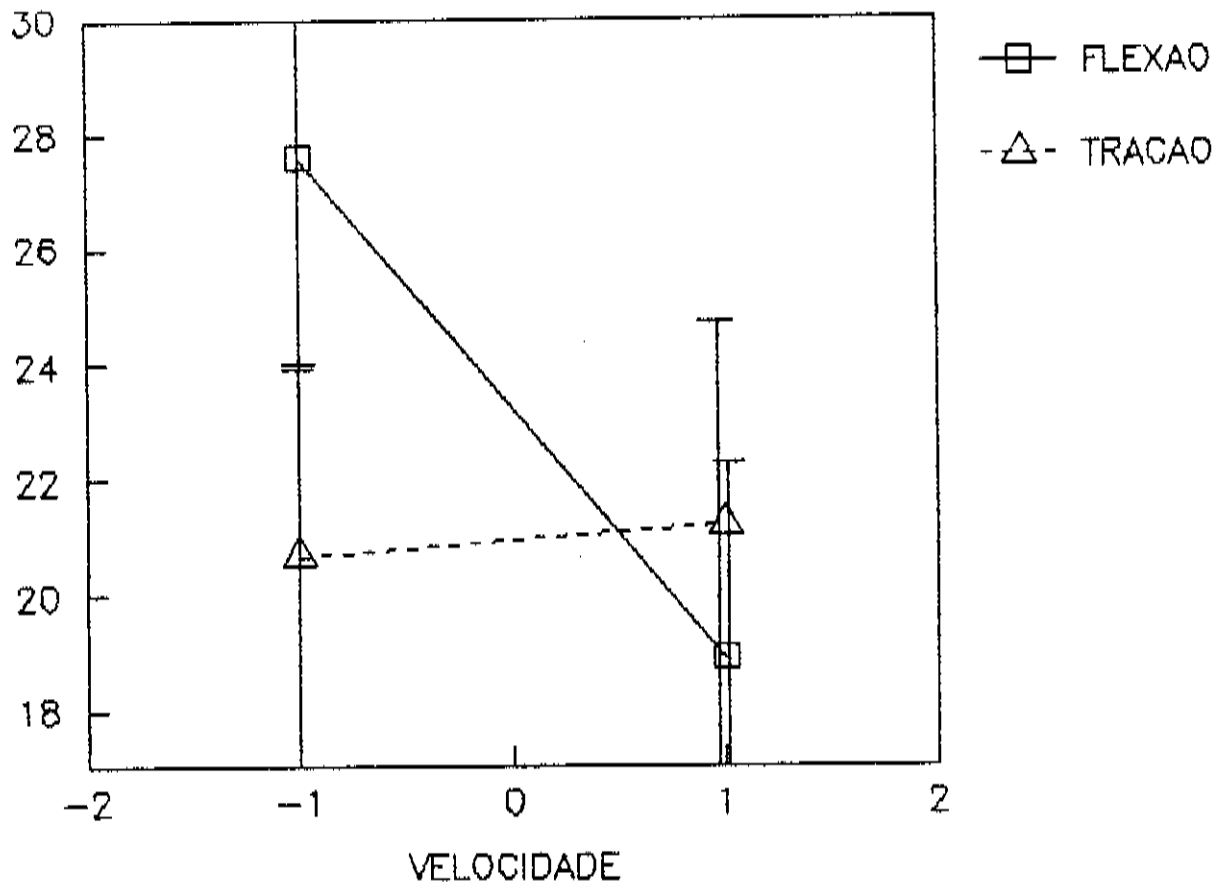


FIGURA 32 – Interação vel-tipo teste com intervalo de confiança.

INTERACAO TENSAO-TIPO TESTE

PARAM SUSCEP "N"

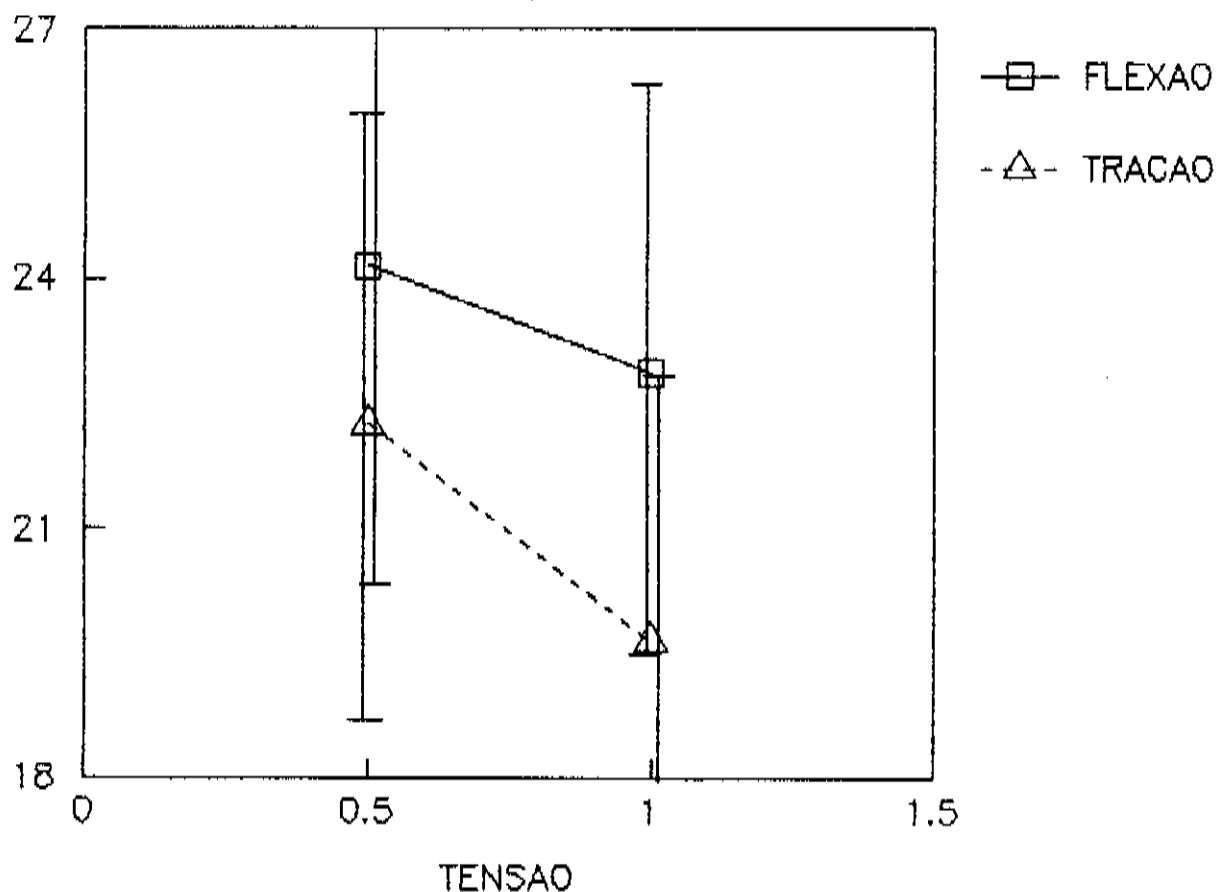


FIGURA 33 – Interação ten–tipo teste com intervalo de confiança.

INTERAÇÃO VEL-TEN-RES

TESTE FLEXÃO

PARAM SUSCEP "N"

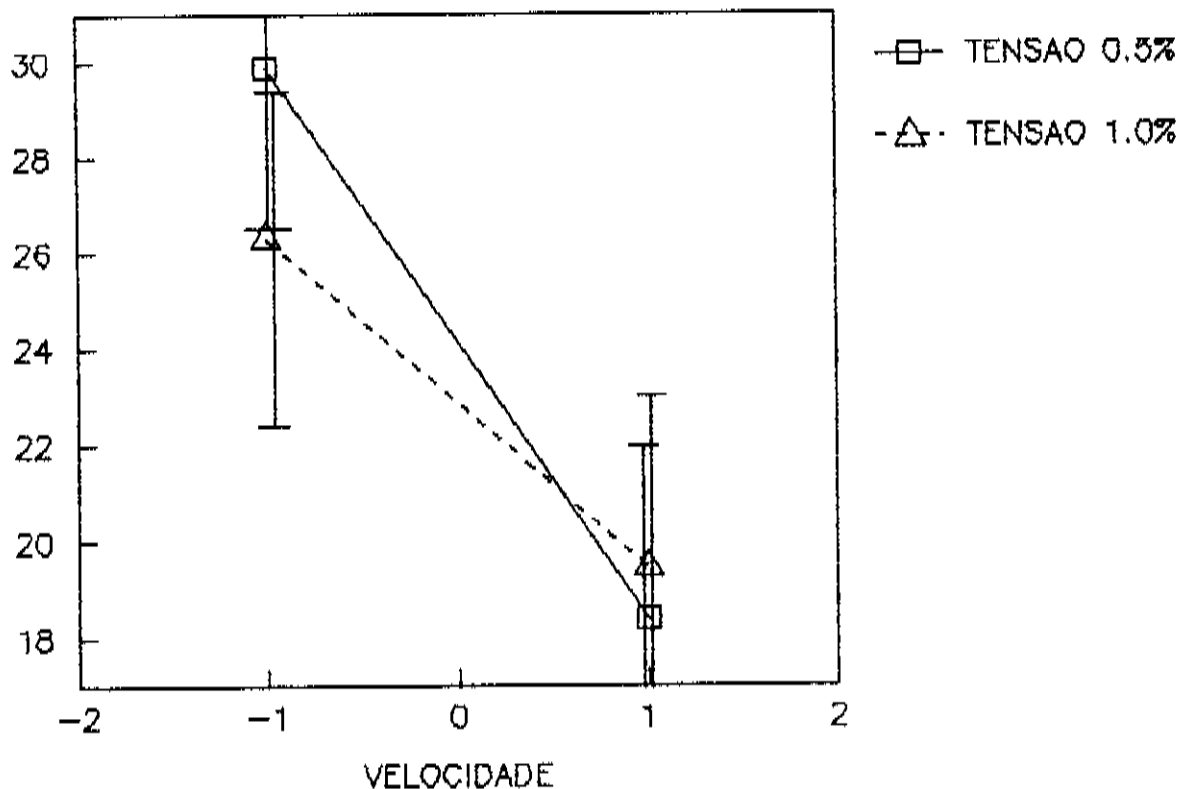


FIGURA 34 – Interação tripla, flexão com intervalo de confiança.

INTERACAO VEL-TEN-RES TESTE TRACAO

PARAM SUSCEP "N"

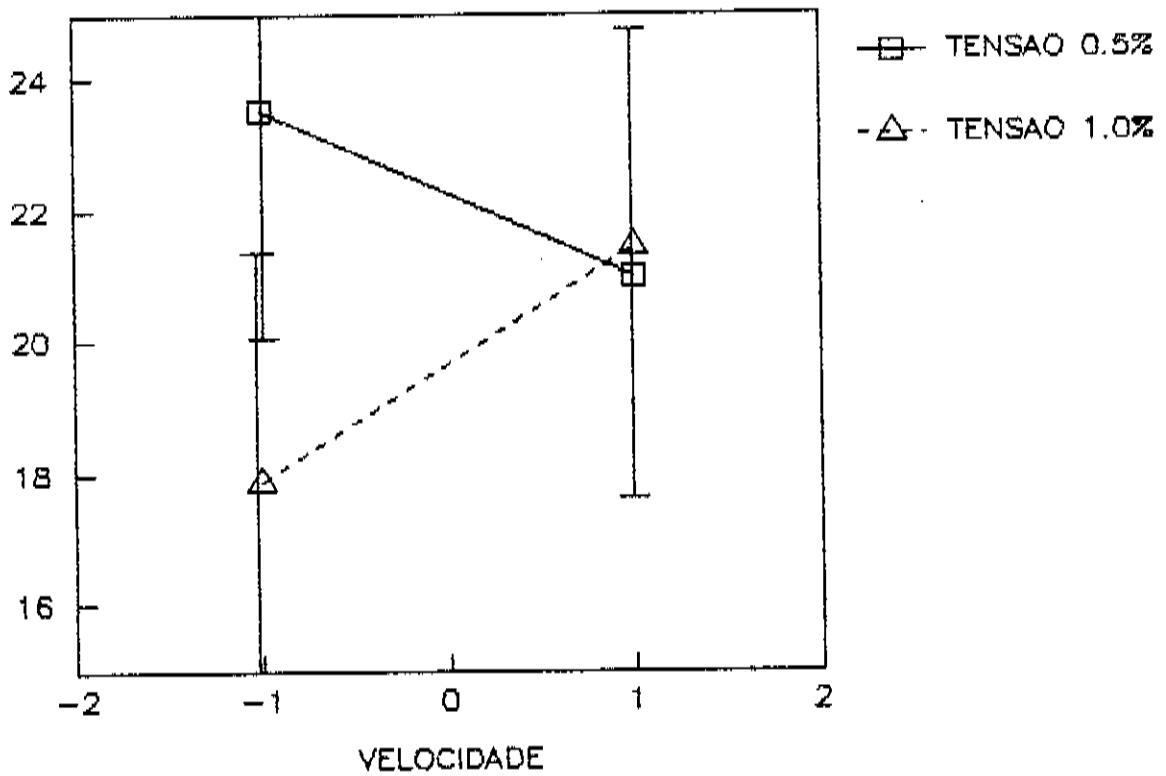


FIGURA 35 – Interação tripla, tração com intervalo de confiança.