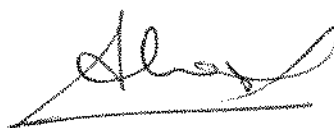


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Este exemplar corresponde  
a redação definitiva da tese  
defendida por Hermann J.C. Voornald  
e aprovada pela Comissão Examinadora  
em 20/04/88

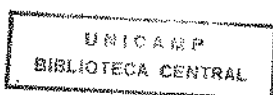


PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA EM CHAPAS  
FINAS DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESIS  
TÊNCIA SOB CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VA  
RIÁVEL.

22/87

Trabalho apresentado à Comissão de  
Pós-Graduação da Faculdade de En  
genharia de Campinas, como parte  
dos requisitos para a obtenção do  
título de Doutor em Engenharia Me  
cânica.

CAMPINAS, 1988



Este exemplar corresponde a Redação da Tese defendida por  
HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD e aprovada pela Comissão  
Examinadora em 20/04/1988.



ANA MARIA MARTINEZ NAZAR

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

Tese de: Doutorado

Título da Tese: Propagação da trinca por fadiga em  
chapas finas de liga de alumínio de  
alta resistência sob carregamentos  
de amplitude variável


Autor: Herman Jacobus Cornelis Voorwald


Orientadora: Ana Maria Martinez Nazar

Aprovado por

Prof. Dr.  , Presidente

Prof. Dr. 

Prof. Dr. 

Prof. Dr. 

Prof. Dr. 

Campinas, de

1988

HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD

ENG<sup>o</sup> MECÂNICO, FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ- UNESP-1979

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA-ITA-1983

PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA EM  
CHAPAS FINAS DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA  
RESISTÊNCIA SOB CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

CAMPINAS, 1988

Aos meus pais.

À minha esposa Tânia

e aos meus filhos

Ana Carolina

Fabiana e

Herman

## AGRADECIMENTOS

À Professora ANA MARIA MARTINEZ NAZAR, orientadora desta tese, pelo estímulo, cooperação e apoio dedicados ao autor.

Ao Professor Olegário Perez, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, que autorizou o uso do equipamento necessário à realização do desenvolvimento experimental do trabalho.

Aos funcionários do Centro de Processamentos de Dados da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetã pelo apoio e facilidades concedidas.

À secretária do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetã, Srta. Maria Aparecida Alkmin, pelo inestimável trabalho de datilografia.

A todos que de uma forma direta ou indireta, contribuíram na elaboração deste trabalho.

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi o de estudar os principais efeitos de interação na taxa de propagação de uma trinca por fadiga, em amostras de uma liga de alumínio 2024-T3 de espessura fina, submetida a carregamentos de amplitude variável.

Os efeitos de interação estudados foram os seguintes:

1. Aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de sequência ascendente.

2. Retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de sequência descendente.

3. O efeito de cargas de tração de valor menor do que as anteriores, na redução do retardo no crescimento da trinca.

Na elaboração dos modelos teóricos foram utilizados a equação de Forman, que representa bem os dados empíricos obtidos em carregamentos de amplitude constante e o modelo de Willenborg.

Com os resultados obtidos foi possível obter um modelo geral que pode representar o crescimento de uma trinca por fadiga submetida a um carregamento de amplitude variável.

## ABSTRACT

This thesis has the objective of studying the interaction effects on the fatigue crack propagation rate in thin samples of an aluminium alloy 2024-T3, subjected to variable amplitude loading.

The following interaction effects were studied:

1. Acceleration on the fatigue crack propagation rate in ascendent sequence loading.
2. Retardation effects on the fatigue crack propagation rate in descendent sequence loading.
3. The effect of underloads on the retardation of the fatigue crack growth.

To obtain the theoretical models that represent the interaction effects, the Forman expression and the Willenborg model were employed.

It was possible, with those results, to elaborate a final model that represents the growth of a fatigue crack subjected to variable amplitude loading.



## I N D I C E

CAPÍTULO I - Crescimento da trinca por fadiga e mecânica da fratura	
1.1	Introdução . . . . . 1
1.2	Efeito da influência do carregamento na taxa de propagação da trinca por fadiga . . . . . 7
1.2.1	Modelos representativos do retardo na propagação da trinca . . . . . 11
1.2.1.1	Modelo de Wheeler
1.2.1.2	Modelo de Willenborg . . . . . 14
1.2.1.3	Modelo de Elber . . . . . 19
1.2.2	Análises para carregamentos de amplitude variável . 23
1.3	Objetivo . . . . . 31
CAPÍTULO II	
2.1	Antecedentes . . . . . 32
CAPÍTULO III - Procedimento Experimental . . . . . 35	
3.1	Material . . . . . 35
3.2	Corpos de prova . . . . . 35
3.2.2	Corpo de prova para o ensaio de fadiga . . . . . 36
3.3	Equipamento . . . . . 38
CAPÍTULO IV - Resultados e Discussões . . . . . 40	
4.1	Programa de trabalho . . . . . 40
4.2	Primeiro Programa de Ensaios . . . . . 41

4.3	Programa Intermediário de Ensaios . . . . .	66
4.4	Aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga . . . . .	72
4.4.1	Modelo para a aceleração no crescimento da fissura.	107
4.5	Retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga.	116
4.5.1	Estudo dos parâmetros que atuam na intensidade do retardo na propagação da fissura . . . . .	118
4.5.1	a) Relação $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$ . . . . .	118
4.5.1	b) Número de ciclos na carga alta . . . . .	130
4.5.2	Modelo para o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga . . . . .	141
4.5.2.1	Restrições do modelo de Willenborg . . . . .	142
4.5.2.2	Estudo dos parâmetros que afetam a relação $\frac{K \text{ reduzido experimental}}{K \text{ reduzido Willenborg}}$ . . . . .	149
4.5.2.3	Análise da influência de cada um dos parâmetros, $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$ , número de ciclos na carga alta e número de ciclos na carga baixa, no fator $\frac{K \text{ reduzido experimental}}{K \text{ reduzido Willenborg}}$ . . . . .	152
4.5.2.4	Determinação do modelo de Willenborg modificado. . . . .	157
4.6	Efeito de cargas de tração de amplitude menor do que as anteriores, aplicadas após a sequência descendente de carregamento, na taxa de propagação da trinca por fadiga . . . . .	164
4.6.1	Quinto Programa de Ensaios . . . . .	165
4.7	Comentários Gerais . . . . .	175
4.7.1	Considerações iniciais . . . . .	175
4.7.2	Modelo final . . . . .	178

CAPÍTULO V - Conclusões e Sugestões . . . . .	182
5.1 Conclusões . . . . .	182
5.2 Sugestões para futuros trabalhos . . . . .	185
BIBLIOGRAFIA . . . . .	187

## Í N D I C E D A S F I G U R A S

Figura 1	-	Corpo de prova com fissura central usado em estudos de propagação da trinca por fadiga . . . . .	3
Figura 2	-	Taxa de propagação da trinca por fadiga . . . . .	5
Figura 3	-	Representação do retardo na propagação da trinca devido à aplicação de sobrecargas de tração . . . . .	8
Figura 4	-	Variação da taxa de crescimento da trinca seguindo a aplicação de uma sobrecarga . . . . .	10
Figura 5	-	Relação das zonas de escoamento na ponta da trinca no modelo de Wheeler de retardo no crescimento da trinca . . . . .	13
Figura 6	-	Espectro utilizado para descrever o modelo de Willenborg . . . . .	15
Figura 7	-	Representação de $\Delta K$ ef. para o modelo de Willenborg . . . . .	18
Figura 8	-	Representação da zona plástica na ponta da trinca e do "envólucro plástico" deixado no caminho da trinca que está crescendo. . . . .	20
Figura 9	-	Intervalo intensidade de tensão efetivo proposto por Elber. . . . .	21
Figura 10	-	Representação da variação da intensidade de tensão do fechamento da trinca com a sequência de carregamento e a correspondente variação de $\Delta K$ ef. . . . .	22

Figura 11	-	Forma e dimensões (mm) dos CDPs para os ensaios de tração . . . . .	36
Figura 12	-	Forma e dimensões (mm) dos CDPs utilizados nos ensaios de fadiga . . . . .	37
Figura 13	-	Leitura do comprimento da trinca . . . . .	39
Figura 14	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (6000±3500)N. . . . .	42
Figura 15	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (7500±3500)N . . . . .	42
Figura 16	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (9000±3500)N. . . . .	43
Figura 17	-	Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos. . . . .	43
Figura 18	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N . . . . .	44
Figura 19	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (6500±2500)N . . . . .	45
Figura 20	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (7000±2500)N . . . . .	46
Figura 21	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (7500±2500)N . . . . .	47
Figura 22	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (8000±2500)N . . . . .	48
Figura 23	-	Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos. . . . .	49

Figura 24	-	Relação entre a sobrecarga e a carga de referência para a qual ainda ocorre o retardo no crescimento da trinca. . . . .	50
Figura 25	-	Relação entre a sobrecarga e a carga de referência para a qual ocorre uma parada completa no crescimento da trinca. . . . .	51
Figura 26	-	$\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}} = 1,2$ . . . . .	53
Figura 27	-	$\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}} = 1,27$ . . . . .	54
Figura 28	-	$\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}} = 1,33$ . . . . .	55
Figura 29	-	$\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}} = 1,4$ . . . . .	56
Figura 30	-	$\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}} = 1,6$ . . . . .	57
Figura 31	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos para carregamento com sobrecarga . . . . .	58
Figura 32	-	Curvas $\frac{da}{dN} \times \ln \Delta K$ . . . . .	64
Figura 33	-	Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos experimentais e valores teóricos obtidos pela equação de Forman . . . . .	65
Figura 34	-	Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca . . . . .	68

Figura 35	-	Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca . . . . .	69
Figura 36	-	Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca . . . . .	70
Figura 37	-	Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca . . . . .	71
Figura 38	-	Segundo programa de ensaios . . . . .	72
Figura 39	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N → (6500±2500)N. 1ª Ensaio . . . . .	76
Figura 40	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N → (6500±2500)N. 2ª Ensaio . . . . .	77
Figura 41	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N → (7000±2500)N. 1ª Ensaio . . . . .	78
Figura 42	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N → (7000±2500)N. 2ª Ensaio. . . . .	79
Figura 43	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos (5000±2500)N → (7500±2500)N. 1ª Ensaio. . . . .	80
Figura 44	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N → (7500±2500)N. 2ª Ensaio. . . . .	81
Figura 45	-	Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N → (8000±2500)N.	

	19 Ensaio . . . . .	82
Figura 46	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (8000 \pm 2500)N$ .	
	29 Ensaio . . . . .	83
Figura 47	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (6500 \pm 2500)N$ . .	86
Figura 48	- Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7000 \pm 2500)N$ . .	87
Figura 49	- Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7500 \pm 2500)N$ . .	88
Figura 50	- Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (8000 \pm 2500)N$ . .	89
Figura 51	- Terceiro programa de ensaios . . . . .	94
Figura 52	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (6500 \pm 2500)N$ . Blocos 10,00mm, 18,00mm . . . . .	97
Figura 53	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (6500 \pm 2500)N$ . Blocos 14,00mm, 22,00mm . . . . .	98
Figura 54	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7000 \pm 2500)N$ . Blocos 10,00mm, 18,00mm . . . . .	99
Figura 55	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7000 \pm 2500)N$ . Blocos 14,00mm, 22,00mm. . . . .	100
Figura 56	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7500 \pm 2500)N$ .	



	Blocos 10,00mm, 18,00mm . . . . .	101
Figura 57	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N + (7500±2500)N.	
	Blocos 14,00mm, 22,00mm . . . . .	102
Figura 58	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N + (8000±2500)N.	
	Blocos 10,00mm, 18,00mm . . . . .	103
Figura 59	- Curva comprimento da trinca versus número de ciclos. (5000±2500)N + (8000±2500)N.	
	Blocos 14,00mm, 22,00mm . . . . .	104
Figura 60	- Quarto programa de ensaios . . . . .	105
Figura 61	- Sequência de carregamento . . . . .	109
Figura 62	- Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 8,00mm e 12,00mm	122
Figura 63	- Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 16,00mm e 20,00mm	123
Figura 64	- Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimento da trinca de 24,00mm. . . . .	124
Figura 65	- Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 8,00mm e 12,00mm	125
Figura 66	- Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 8,00mm e 12,00mm	126
Figura 67	- Resultado do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 16,00mm e 20,00mm	127
Figura 68	- Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 16,00mm e 20,00mm	128

Figura 69	-	Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimento da trinca de 24,00mm . . . . .	129
Figura 70	-	Comprimento da trinca versus número de <u>ci</u> clos para a relação $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r} = 1,2$ . . . . .	131
Figura 71	-	Comprimento da trinca versus número de <u>ci</u> clos para a relação $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r} = 1,27$ . . . . .	132
Figura 72	-	Comprimento da trinca versus número de <u>ci</u> clos para a relação $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r} = 1,33$ . . . . .	133
Figura 73	-	Comprimento da trinca versus número de <u>ci</u> clos para a relação $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r} = 1,4$ . . . . .	134
Figura 74	-	Conceito de número de ciclos de retardo, ND, envolvendo picos e blocos de sobrecarga	137
Figura 75	-	Representação do número de ciclos do retar do em função do número de ciclos na carga alta . . . . .	138
Figura 76	-	Relação entre $\frac{K \text{ red. exp.}}{K \text{ red. Will.}}$ e $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ . . . . .	154
Figura 77	-	Relação entre $\frac{K \text{ red. exp.}}{K \text{ red. Will.}}$ e o número de ciclos na carga alta . . . . .	156
Figura 78	-	Relação entre $\frac{K \text{ red. exp.}}{K \text{ red. Will.}}$ e o número de <u>ci</u> clos na carga baixa. . . . .	158
Figura 79	-	Seqüência do espectro de carregamento. . . . .	164
Figura 80	-	Segundo Programa de Ensaio indicando as modificações para o Quinto Programa . . . . .	165

Figura 81	-	Efeito da carga de tração na propagação da trinca . . . . .	167
Figura 82	-	Efeito da carga de tração na propagação da trinca . . . . .	168
Figura 83	-	Efeito da carga de tração na propagação da trinca . . . . .	169
Figura 84	-	Efeito da carga de tração na propagação da trinca . . . . .	170
Figura 85	-	Efeito de se desligar a máquina de ensaio durante o retardo no crescimento da fissu <u>ra</u> . . . . .	173
Figura 86	-	Diagrama de blocos (simplificado), do modelo final . . . . .	179

## Í N D I C E D A S T A B E L A S

Tabela 1	-	Composição química da liga de alumínio 2024-T3 . . .	35
Tabela 2	-	Propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024-T3 . . . . .	36
Tabela 3	-	Determinação das constantes C e n da equação de Forman . . . . .	63
Tabela 4	-	Medidas do comprimento da trinca após a apli- cação das sobrecargas . . . . .	74
Tabela 5	-	Número de ciclos envolvidos em cada um dos blocos para os vários níveis de sobrecarga .	75
Tabela 6	-	Medidas do comprimento da trinca . . . . .	85
Tabela 7	-	Valores dos fatores intensidade de tensão máximo e mínimo (MPa $\sqrt{m}$ ) . . . . .	92
Tabela 8	-	Dimensões da zona plástica na ponta da trin- ca . . . . .	93
Tabela 9	-	Medidas do comprimento da trinca após a apli- cação das sobrecargas . . . . .	96
Tabela 10	-	Valores do comprimento da trinca na frequên- cia de ensaio de 1 HZ . . . . .	106
Tabela 11	-	Comparação entre os resultados experimentais do comprimento da trinca e os valores forne- cidos pela equação de Forman . . . . .	108
Tabela 12	-	Valores do comprimento da trinca no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga . . . . .	112
Tabela 13	-	Relação entre as variações no comprimento da trinca no primeiro ciclo de aplicação da so- brecarga, através das equações de Forman mo	

	dificado e equação de Forman . . . . .	113
Tabela 14	- Valores do comprimento da trinca fornecidos pela equação de Forman e equação de Forman modificada . . . . .	115
Tabela 15	- Número de ciclos envolvidos em cada um dos blocos no terceiro programa de ensaios . .	117
Tabela 16	- Relações entre os números de ciclos nos vários blocos do segundo e terceiro programa de ensaios . . . . .	121
Tabela 17	- Relação entre o número de ciclos na carga alta e o número de ciclos na carga de referência . . . . .	140
Tabela 18	- Comprimentos da trinca. Resultados obtidos experimentalmente e através do modelo de Willenborg . . . . .	143
Tabela 18	- Comprimentos da trinca. Resultados obtidos experimentalmente e através do modelo de Willenborg (cont.) . . . . .	144
Tabela 19	- Número de ciclos de atuação do modelo de Willenborg . . . . .	147
Tabela 20	- Relações entre K reduzido experimental e K reduzido do modelo de Willenborg . . . .	150
Tabela 21	- Resultados fornecidos pelo modelo de Willenborg modificado . . . . .	162

## N O M E N C L A T U R A

$\frac{da}{dN}$	- Taxa de crescimento da trinca por fadiga
K máximo	- Fator intensidade de tensão máximo
K mínimo	- Fator intensidade de tensão mínimo
$\Delta K$	- K máximo - K mínimo
$R = \frac{K \text{ mínimo}}{K \text{ máximo}}$	- Razão entre o valor mínimo de K e o valor máximo de K, em um dado ciclo.
$K_c$	- Fator intensidade de tensão crítico
$\Delta K_{th}$	- Fator intensidade de tensão limite (Threshold)
$\Delta K_{rms}$	- Intervalo intensidade de tensão raiz quadrada média
$R_{rms} = \frac{\sigma_{min \text{ rms}}}{\sigma_{max \text{ rms}}}$	- razão de tensões raiz quadrada média
K máx S.c	- Fator intensidade de tensão máximo na sobrecarga
K máx C.r	- Fator intensidade de tensão máximo na carga de referência
$2 r_y$	- Diâmetro da zona plástica
$\sigma_e$	- Limite de escoamento do material
K min C.r	- Fator intensidade de tensão mínimo na carga de referência
K acelerado	- K máx S.c - K mín C.r
ND	- Número de ciclos de retardo
NS	- Número de ciclos de saturação na carga alta
K reduzido do modelo de Willenborg	- É o valor de K reduzido = K requerido - K máx 2,1, obtido pelo modelo de Willenborg

K reduzido experimental - Após um determinado número de ciclos na carga baixa, é obtido o valor experimental do comprimento da trinca. Com este valor verifica-se os resultados fornecidos pelo modelo de Willenborg e se determina o K reduzido necessário para que após o mesmo número de ciclos a fissura tivesse o comprimento observado experimentalmente.

$\frac{K \text{ red. } 1}{K \text{ red. } W}$  - Relação entre o K reduzido experimental do 1º ensaio do 2º programa de ensaios e o K reduzido do modelo de Willenborg

$\frac{K \text{ red. } 2}{K \text{ red. } W}$  - Relação entre o K reduzido experimental do 2º ensaio do 2º programa de ensaios e o K reduzido do modelo de Willenborg

$\frac{K \text{ red. } 3}{K \text{ red. } W}$  - Relação entre o K reduzido experimental do 3º programa e o K reduzido do modelo de Willenborg

K reduzido modificado = (K reduzido Willenborg).  $\alpha$

S min - Tensão mínima

S máx - Tensão máxima.

# C A P Í T U L O I

## CRESCIMENTO DA TRINCA POR FADIGA E MECÂNICA DA FRATURA

### 1.1 INTRODUÇÃO

Vamos nos referir a nucleação e crescimento de trincas por fadiga a aquelas que surgiram como resultado da aplicação de carregamentos cíclicos. Para um entendimento do fenômeno é necessário um estudo completo de cada uma das etapas.

Durante muitos anos os dados de fadiga foram apresentados sob a forma das curvas tensão versus número de ciclos, que se tornaram extremamente úteis para a seleção de materiais |1-5|.

Atualmente, um grande número de pesquisas está direcionado na investigação detalhada do crescimento de trincas subcríticas, do seu período de nucleação até um tamanho crítico, através da aplicação dos conceitos da Mecânica de Fratura Linear Elástica |6-11|.

O desenvolvimento conseguido no campo da mecânica da fratura possibilitou o aparecimento de uma nova filosofia para o projeto estrutural: o projeto "Fail-Safe". Aqui, a presença de uma trinca na estrutura não significa que a mesma esteja inutilizada ou prejudicada no seu uso, desde que conheçamos o seu comportamento durante a vida útil da estrutura.

O interesse na propagação da trinca por fadiga foi intensificado com o desenvolvimento de métodos mais precisos para detetar trincas, monitorar e prever o seu crescimento, aliado ao fato de que, em muitos casos, uma grande parte da vida total em serviço de um componente pode ser gasta na propagação da trinca. Assim, por exemplo, estruturas soldadas podem conter defeitos oriundos do processo e o crescimento de trincas original



das de tais falhas pode geralmente determinar a vida do componente.

Mesmo sem estes defeitos já existentes, muitas trincas podem ser originadas em componentes sujeitos a carregamento de fadiga e o crescimento das mesmas pode consumir até 90% de sua vida total [12]. Salienta-se também, que em alguns casos, observa-se que a partir de um determinado ponto acontece a parada total no crescimento da trinca.

O interesse da indústria aeronáutica no conhecimento dos mecanismos envolvidos no crescimento da trinca por fadiga já vem de muitos anos; mais recentemente o mesmo interesse foi despertado nas indústrias automotivas e nucleares, todas visando a segurança e uma utilização racional de material.

A seguir vamos fazer uma revisão do comportamento e dos métodos de se prever o crescimento da trinca por fadiga, baseado nos conceitos da Mecânica de Fratura Linear Elástica.

Muitos dos estudos experimentais realizados com o objetivo de se conhecer o crescimento da trinca por fadiga foram desenvolvidos com carregamento de amplitude constante, com a razão de tensões,  $R$ , ( $R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ ) igual a zero. Na figura 1 está apresentado um dos corpos de prova mais utilizados em tais estudos. O comprimento da trinca,  $2a$ , é medido como uma função do número de ciclos de carga aplicada,  $N$ , através do uso de algumas técnicas tais como, ótica, ultrasônica e outras.

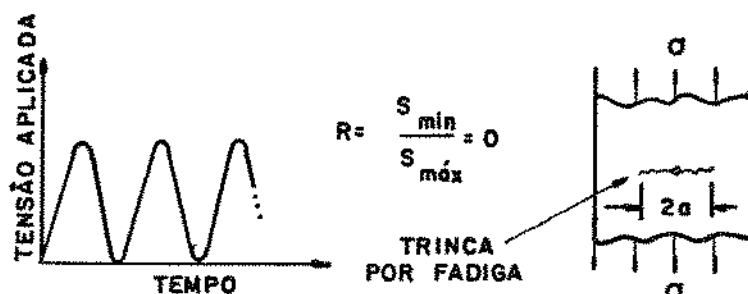


Figura 1 - Corpo de prova com fissura central usado em estudos de propagação da trinca por fadiga.

Muitas expressões de propagação da trinca foram apresentadas em anos passados e a forma simples na qual todas podem ser escritas é :

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma, a, C_i) \quad (1)$$

onde:

- $\sigma$  - tensão aplicada
- $a$  - meio comprimento da trinca
- $C_i$  - constantes

Segundo a revisão feita por Paris [13], Head, Frost e Dugdale e Liu, desenvolveram algumas relações para determinar a taxa de crescimento da trinca, podendo todas assumir a forma geral:

$$\frac{da}{dN} = C \sigma^m a^n \quad (2)$$

onde:  $\sigma$  - tensão de tração aplicada normal à trinca  
 $a$  - comprimento da trinca  
 $C, m, n$  - constantes empíricas

Paris [13] fez uma interpretação dos dados obtidos por Mc Evily e Illg, na taxa de crescimento da trinca em termos de um fator concentração de tensão efetivo na ponta da trinca segundo uma relação semi-empírica da seguinte forma:

$$\log \left( \frac{da}{dN} \right) = C_1 K_n \sigma_{net} - C_2 - C_3 / (K_n \sigma_{net} - C_4) \quad (3)$$

onde:  $K_n$  - fator de concentração de tensão efetivo  
 $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  - constantes empíricas.

É interessante observar que a equação (3) representa uma das primeiras tentativas de se relacionar dados da taxa de crescimento da trinca com "intensidade de tensão" na ponta da mesma.

Posteriormente foram desenvolvidos uma série de outras relações para prever a taxa de crescimento da trinca [14]. Dentre estas, uma contribuição importante ao estudo da propagação da trinca por fadiga foi feita por Paris [13], que propôs uma correlação entre a taxa de crescimento da trinca e a variação do fator intensidade de tensão,  $\Delta K$ , da seguinte forma:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \quad (4)$$

onde: C - constante do material  
 N - número de ciclos  
 n - constante do material

Para as ligas de alumínio 2024-T3 e 7075-T6, o valor  $n = 4$  fornece um bom ajuste aos dados experimentais [12], não podendo entretanto, ser usado universalmente. Foram tabelados valores de  $n$  para vários metais e foi observado uma variação de  $n = 2,3$  a  $6,7$ , com um valor médio em torno de  $n = 4,5$  [15].

Na figura 2 está representado o relacionamento entre dados da taxa de crescimento da trinca em amplitude constante com a variação do fator intensidade de tensão, na forma  $\log \left( \frac{da}{dN} \right)$  versus  $\log (\Delta K)$ .

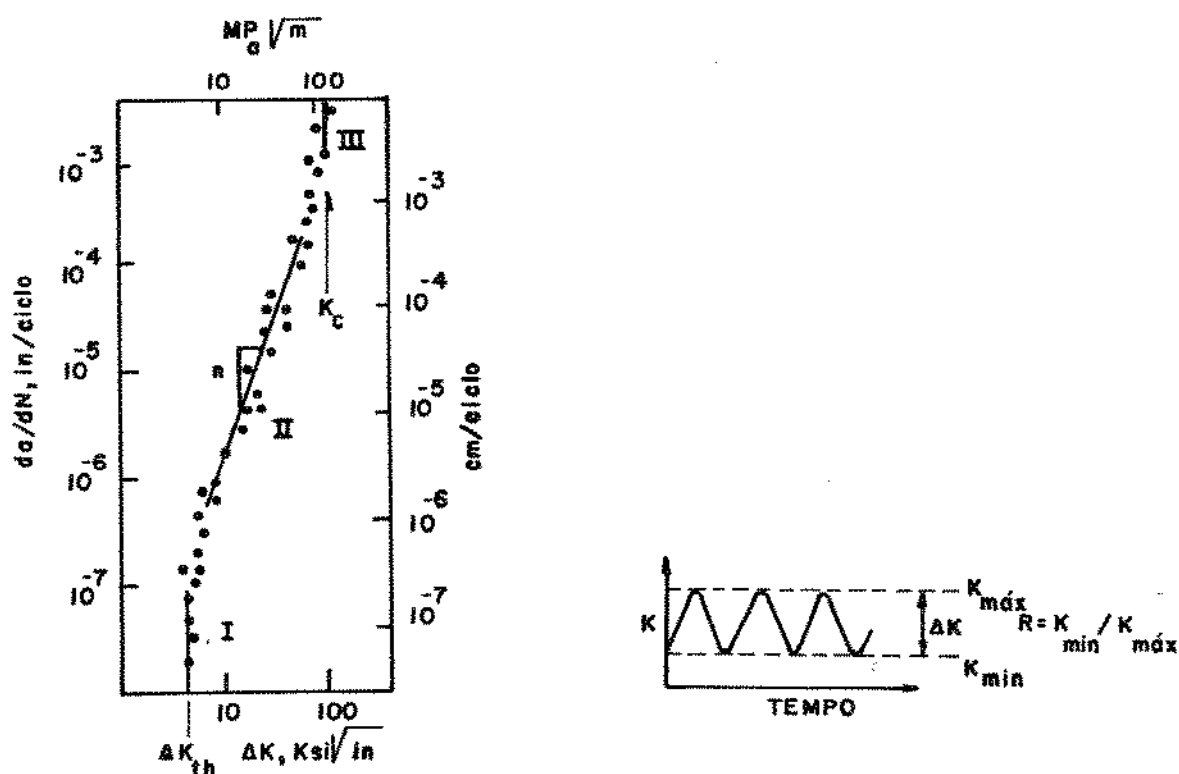


Figura 2 - Taxa de propagação da trinca por fadiga [6].

Podemos observar na figura 2 a variação do fator intensidade de tensão abaixo do qual não há o crescimento da trinca, chamado de fator intensidade de tensão limite,  $\Delta K_{th}$ .

Os valores do fator intensidade de tensão limite foram tabelados para uma série de metais. Para as ligas de alumínio o valor usual está entre 3 e 7 MPa  $\sqrt{m}$ , enquanto que para os aços o valor situa-se entre 6 e 17 MPa  $\sqrt{m}$  [12].

A correlação entre a taxa de crescimento da trinca e a variação do fator intensidade de tensão, desenvolvida por Paris e apresentada na equação (4), satisfaz os dados experimentais para valores de  $\frac{da}{dN}$  no intervalo  $10^{-6}$  a  $10^{-3}$  cm/ciclo.

A maior parte dos problemas de propagação da trinca por fadiga em estruturas e componentes mecânicos aplicados em engenharia, ocorre na região II da curva  $\frac{da}{dN}$  versus  $\log \Delta K$ , sendo portanto de grande utilidade conhecer os mecanismos que atuam na taxa de propagação da fissura nesta região.

Um crescimento mais rápido da taxa  $\frac{da}{dN}$  é observado à medida em que o fator intensidade de tensão se aproxima do valor da intensidade de tensão crítica,  $K_c$ , como pode ser observado na figura 2.

Em 1967, R.G. Forman, V.E. Kearney e R.M. Engle [16] introduziram dois outros parâmetros na equação de Paris, a saber: a razão  $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$  da carga cíclica aplicada e o fator intensidade crítico de tensão,  $K_c$ .

A expressão é da seguinte forma:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^n}{(1-R) K_c - \Delta K} \quad (5)$$

onde: R - razão entre o valor mínimo de K e o valor máximo de K, em um dado ciclo.  
 Kc - fator intensidade de tensão crítico  
 $\Delta K$  - K máximo - K mínimo

A correlação entre a taxa de crescimento da trinca por fadiga ( $\frac{da}{dN}$ ) e a variação do fator intensidade de tensão ( $\Delta K$ ), proposta por Paris, descreve o comportamento na região central da curva  $\log(\frac{da}{dN}) \times \log(\Delta K)$ , representada na figura 2, como região II. Os dados na região superior e inferior, descritos na figura 2 como região III e região I respectivamente, são assintóticos a linhas verticais, não sendo o seu comportamento, portanto, modelado pela equação (4) [17,18].

Vários modelos de taxa de crescimento da trinca por fadiga foram desenvolvidos levando em consideração a razão de tensões (R) ou outros efeitos sob condições de carregamento de amplitude constante [19,20]. Na referência [19] podemos observar alguns modelos testados, nas mesmas condições onde é mostrado que a maior parte dos mesmos descreve os dados de taxa de crescimento da trinca por fadiga de modo que as previsões da vida sob amplitude constante estão ao redor de 20% das vidas experimentais, em mais de 80% dos testes.

## 1.2 EFEITO DA INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO NA TAXA DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA.

Diferenças muito maiores entre as previsões e a propagação real de uma trinca são observadas quando o carregamento dinâmico apresenta um espectro de cargas de amplitudes variáveis.

Estas diferenças são atribuídas a interações em  $\frac{da}{dN}$  quando a amplitude do carregamento cíclico é aumentada ou reduzida.

Nos anos de 1960, foram observados os efeitos da sequência de carregamento no crescimento da trinca através da constatação de uma taxa de crescimento menor, após a aplicação de uma sobrecarga, do que seria sem a aplicação da mesma [21]. O fenômeno é responsável por uma vida útil total do componente sujeito a um carregamento alto-baixo, maior do que seria sob um carregamento de amplitude constante. Este comportamento é chamado de retardo na propagação da trinca e se o valor da sobrecarga for suficientemente grande, podemos observar, inclusive, uma parada total no crescimento da mesma. Na figura 3 está ilustrado o retardo na propagação da trinca devido à aplicação de sobrecargas de tração.

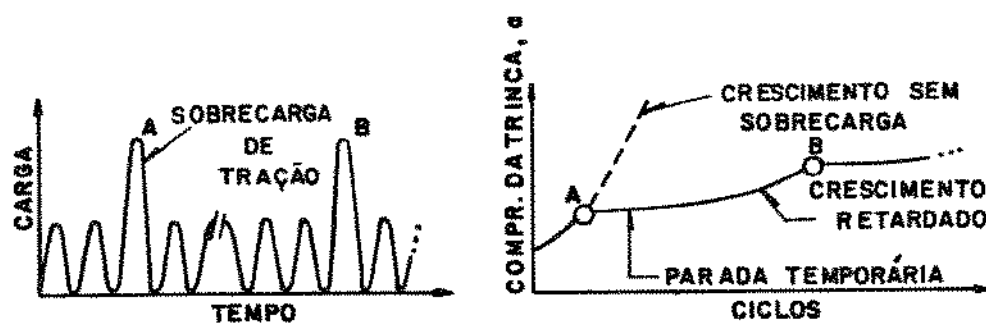


Figura 3 - Representação do retardo na propagação da trinca devido à aplicação de sobrecargas de tração [12].

Ambos os fenômenos, o retardo na propagação da trinca e a parada total no crescimento da mesma, tem sido estudados exhaustivamente nos últimos anos com o objetivo de se entender o comportamento sob carregamento senoidal, com sobrecargas simples ou múltiplas [22-24].

O retardo no crescimento da trinca foi investigado experimentalmente para alguns aços [25-28], ligas de alumínio [24,28-35] e ligas de titânio Ti-6Al-4V [33,36]. As observações mais importantes com relação aos efeitos da interação nos testes devido às sobrecargas ou carregamentos em blocos, podem ser resumidas da seguinte maneira:

1) Sobrecargas positivas introduzem retardos significativos no crescimento da trinca. De um modo geral, retardos mais longos são obtidos:

- a) aumentando a magnitude da sobrecarga [24,29,31,32].
- b) repetindo a sobrecarga durante a vida de propagação da trinca [30].
- c) aplicando blocos de sobrecarga ao invés de simples sobrecargas [29,30,33].

Foi verificado em alguns trabalhos que o retardo no crescimento da trinca não necessariamente ocorre após a aplicação da sobrecarga; um crescimento adicional pode acontecer antes que a taxa de crescimento diminua [29,37]. Em outros trabalhos foi observado inclusive uma pequena aceleração inicial. Este "atraso no retardo" é constatado pela observação do espaçamento de estrias [37]. Na figura 4 está representado a variação da taxa de crescimento da trinca, seguindo a aplicação de uma sobrecarga.



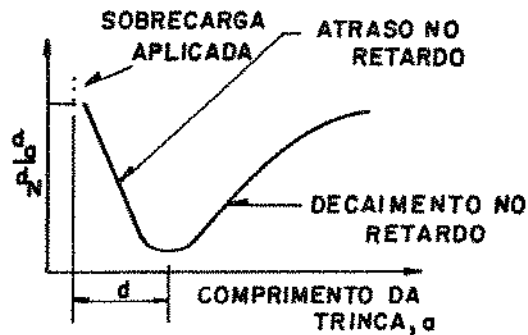


Figura 4 - Variação da taxa de crescimento da trinca seguindo a aplicação de uma sobrecarga |29|.

2) A extensão da trinca causada pelas sobrecargas é maior do que o esperado de testes da amplitude constante |33|.

3) Subcargas\* negativas tem um efeito relativamente pequeno no crescimento da trinca. Foi observado que cargas negativas aplicadas imediatamente após sobrecargas positivas, podem reduzir o retardo no crescimento da trinca que ocorreria se a mesma não fosse aplicada |33|. No caso da carga negativa preceder a sobrecarga positiva, a redução no retardo pode ser menor |31|.

Portanto, pode-se concluir que há um aparente efeito de seqüência nos ciclos de sobrecarga.

4) Em carregamento de blocos, uma seqüência alta-baixa produz resultados similares aos observados nos picos de sobrecarga. Novamente, foi observado o atraso no retardo. Efeitos de mudança na taxa de propagação da trinca após a seqüência baixa-alta são dificilmente detectados em observações macroscópicas do crescimento da trinca; no entanto, medidas mais precisas e estrias indicam um crescimento da trinca localmente acelerado |37|.

\*Subcarga - Cargas de trabalho menores do que a carga de referência.

5) O retardo é função da ductilidade do material. Se a ductilidade de uma liga é controlada por tratamento termomecânico, um limite de escoamento menor produzirá retardos maiores [27].

Como foi verificado nos diversos trabalhos envolvendo picos e blocos de sobrecarga, se uma seqüência de carregamento alto-baixo pode produzir retardo no crescimento da trinca, uma seqüência de carregamento baixo-alto pode causar uma aceleração no crescimento da mesma [29,30,33,37-40]. Matheus [38] realizou testes nos quais a seqüência de carregamento era em dois blocos baixo-alto e verificou que as taxas de crescimento seguindo o aumento na intensidade de tensão eram quase quatro vezes maiores do que as taxas de crescimento em carregamento de amplitude constante, no nível mais alto. Observou também que a aceleração se estabiliza mais rapidamente comparada com os efeitos do retardo.

### 1.2.1 Modelos Representativos do Retardo na Propagação da Trinca

Quando na seqüência do carregamento cíclico constante reduzimos a sua intensidade máxima; isto é, passamos para um carregamento cíclico descendente, observamos um retardo na velocidade de propagação da fissura:  $\frac{da}{dN}$  decresce. Vários modelos matemáticos, tais como os de O.E.Wheeler [25], Wolf Elber [41], E.F.J.Von Euw et.al [29], J. Willenborg et. al [42], foram desenvolvidos para representar analiticamente a intensidade do retardo na propagação da trinca, devido a sobrecargas de tração ocasionais aplicadas em carregamentos de amplitude variável.

#### 1.2.1.1 Modelo de Wheeler

A seguir vamos mostrar a natureza semi-empírica de tais aproximações através do modelo de Wheeler.

Aceitando o fato de que o crescimento da trinca por ciclo de carga pode ser representado por  $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$ , ou melhor,  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$ , Wheeler propôs um crescimento da trinca ciclo por ciclo, de acordo com a expressão:

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r \left( \frac{da}{dN} \right)_i \quad (6)$$

onde:  $a_0$  - comprimento da trinca inicial

$a_r$  - comprimento da trinca após  $r$  ciclos

$\left( \frac{da}{dN} \right)_i$  - crescimento devido ao ciclo  $i$

Para levar em consideração os efeitos do retardo, Wheeler propôs a representação da taxa de crescimento retardado através da expressão:

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_i \Big|_{\text{ret}} = (Cp)_i \left| C(\Delta K)_i^n \right| \quad (7)$$

onde  $(Cp)_i$  é o parâmetro de retardo para o ciclo  $i$ , podendo assumir os valores de 0 a 1 que indicam, respectivamente, parada no crescimento da trinca ou nenhum retardo.

O parâmetro de retardo para o ciclo  $i$ ,  $(Cp)_i$ , foi expresso por Wheeler em termos do tamanho da zona plástica na ponta da trinca associado com o ciclo  $i$  relativo ao tamanho da mesma causado por uma sobrecarga de tração, de acordo com a expressão:

$$(C_p)_i = \left| \frac{(r_y)_i}{a_p - a} \right|^m \quad (8)$$

onde :  $(r_y)_i$  - dimensão da zona plástica em deformação plana.

$$(r_y)_i = \frac{1}{4 \sqrt{2\pi}} \left( \frac{K_{\text{máx } i}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (9)$$

$(a_p - a)$  - distância da ponta da trinca ao contorno da zona de escoamento causada pela última sobrecarga de tração.

$m$  - expoente de forma

Os parâmetros envolvidos no modelo de Wheeler podem ser melhor compreendidos através da representação feita na figura 5.

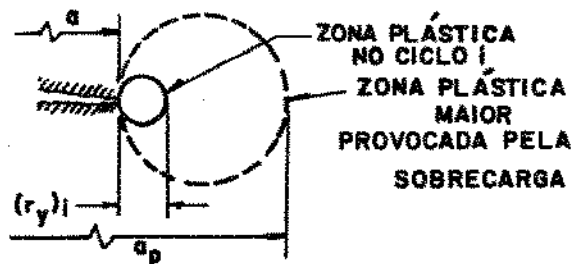


Figura 5 - Relação das zonas plásticas na ponta da trinca no modelo de Wheeler para o retardo, [6].

Assim, segundo o modelo, o retardo cessa quando o contorno da zona plástica no ciclo  $i$  atinge o limite da zona plástica devido a sobrecarga.

Assumido um retardo máximo imediatamente após a aplicação da sobrecarga de tração, diminuindo progressivamente na medida em que a trinca caminha através da zona plástica induzida pela sobrecarga, o modelo não explica o fenômeno do atraso no retardo que foi observado, por alguns autores, após a aplicação de uma sobrecarga de tração simples.

O modelo de Wheeler, através da escolha conveniente do expoente de forma,  $m$ , fornece uma boa concordância com dados experimentais.

No modelo de Wheeler anteriormente apresentado, o fator de retardo  $C_p$  calculado, opera diretamente sobre a função portadora  $\frac{da}{dN}$  reduzindo o seu valor. No entanto, este procedimento requer o conhecimento prévio dos dados obtidos no ensaio para então se encontrar o expoente "m".

#### 1.2.1.2 Modelo de Willenborg

No modelo de Willenborg, o retardo é obtido operando-se diretamente sobre a função  $\Delta K$ . Um valor efetivo de  $\Delta K$  é calculando, assumindo-se uma forma para a tensão residual presente na extremidade da fissura após a aplicação da sobrecarga. Este  $\Delta K$  efetivo é então usado na fórmula para o cálculo de  $\frac{da}{dN}$  relativo a um espectro de carregamento de intensidade constante.

Para melhor descrever o modelo, considera-se o espectro da carga mostrado abaixo:

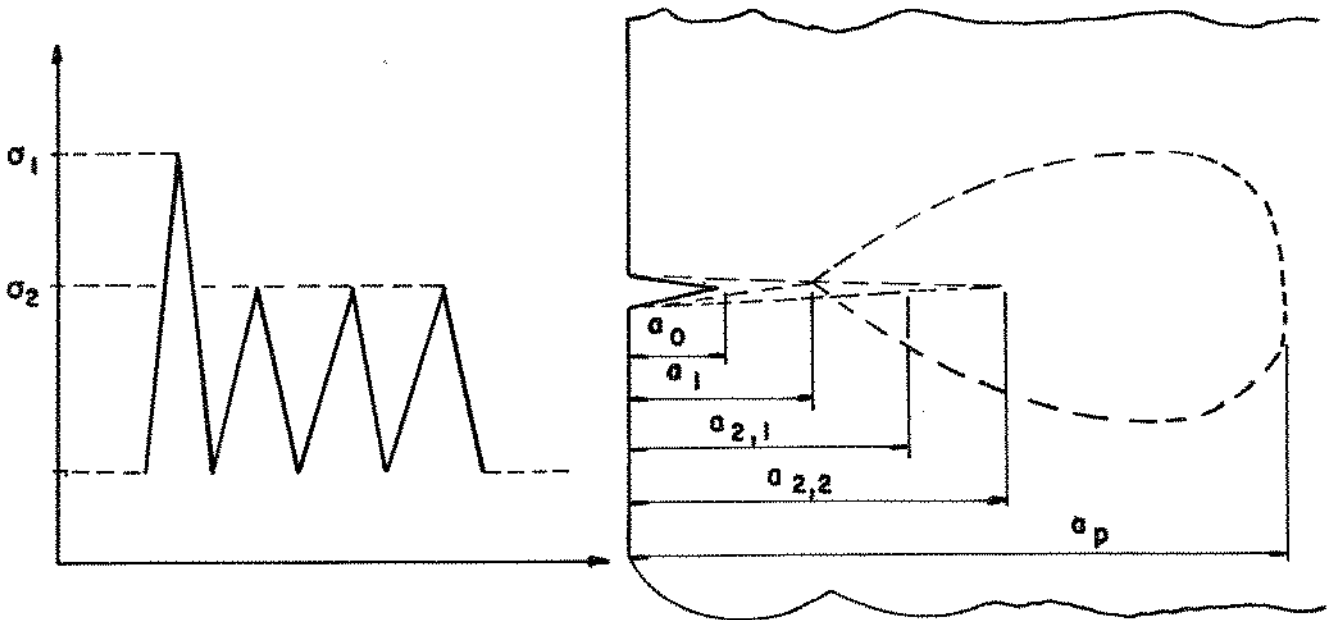


Figura 6 - Espectro utilizado para descrever o modelo de Willenborg.

O modelo é desenvolvido segundo as seguintes etapas:

1. A sobrecarga  $\sigma_1$  é aplicada. A zona plástica criada por  $\sigma_1$  é calculada:

$$a_p = \frac{K_I^2}{2\pi \sigma_e^2} + a_1 \quad (10)$$

2. O primeiro ciclo de tensão  $\sigma_2$  do segundo nível é aplicado. O valor  $\sigma_2$  é comparado com o valor  $\sigma_1$

Se  $\sigma_2 < \sigma_1$ , o modelo de retardo é aplicado.

3. O primeiro passo na aplicação do modelo de retardo é a determinação da tensão requerida,  $\sigma_{req}$ , tensão esta necessária para produzir uma zona plástica que se estenda até os limites de  $a_p$ .

A extensão da zona plástica produzida por  $\sigma_{req}$  é dada pela expressão:

$$r_y = \frac{K^2_{req}}{2\pi \sigma_e^2} = \frac{(\sigma_{req} \sqrt{\pi a_c} \cdot \beta)^2}{2\pi \sigma_e^2} = a_p - a_c$$

ou

$$\sigma_{req} = \frac{\sigma_e}{\beta} \sqrt{\frac{2(a_p - a_c)}{a_c}} \quad (11)$$

onde  $a_c$  é genericamente o comprimento da fissura corrente no início da aplicação do ciclo de ordem  $i$  do segundo nível de tensão.

Portanto, para o primeiro ciclo de tensão ( $i=1$ ) do segundo nível,  $a_c$  se torna igual a  $a_1$  e a equação (11) tem a expressão:

$$\sigma_{req} = \frac{\sigma_e}{\beta} \sqrt{\frac{2(a_p - a_1)}{a_1}}$$

isto é,  $\sigma_{req}$  no primeiro ciclo se torna igual ao valor da sobrecarga  $\sigma_1$ .

4. Willenborg assume que  $K_{m\acute{a}x}$  corrente sofre redução de uma quantidade  $K_{red}$  devido ao ingresso da fissura na zona plástica criada pela sobrecarga:

$$K_{red} = K_{req} - K_{m\acute{a}x} 2,i \quad (12)$$

A equação (12) significa que a intensidade da tensão residual seja dada por:

$$\sigma_{red} = \frac{K_{req}}{\beta \sqrt{\pi a_{2,i}}} - \frac{K_{m\acute{a}x\ 2,i}}{\beta \sqrt{\pi a_{2,i}}} \quad (13)$$

Para o primeiro ciclo de tensão do segundo nível, te remos:

$$K_{red} = K_{req} - K_{m\acute{a}x\ 2,1}$$

Quando a trinca houver propagado através de toda a extensão da zona plástica criada pela sobrecarga, acaba o efeito do retardo e  $K_{red}$  deverá assumir um valor igual a zero.

5. Os valores efetivos de  $K_{m\acute{a}x}$  e  $K_{m\acute{i}n}$  aplicados no segundo nível de tensões serão calculados como segue:

$$K_{m\acute{a}x\ ef.\ 2,i} = K_{m\acute{a}x\ 2,i} - K_{red} \quad (14)$$

$$K_{m\acute{a}x\ ef.\ 2,i} = 2 K_{m\acute{a}x\ 2,i} - K_{req}$$

$$K_{m\acute{i}n\ ef.\ 2,i} = K_{m\acute{i}n\ 2,i} - K_{red} \quad (15)$$

$$K_{m\acute{i}n\ ef.\ 2,i} = K_{m\acute{i}n\ 2,i} + K_{m\acute{a}x\ 2,i} - K_{req}$$

Se  $K_{m\acute{a}x\ ef}$  ou  $K_{m\acute{i}n\ ef}$  se tornar negativo, este valor será igualado a zero. Neste caso,  $\Delta K_{ef}$  será menor do que  $\Delta K_{2,i}$ ; caso contrário,  $\Delta K_{ef} = \Delta K$ , como está representado na figura a seguir.



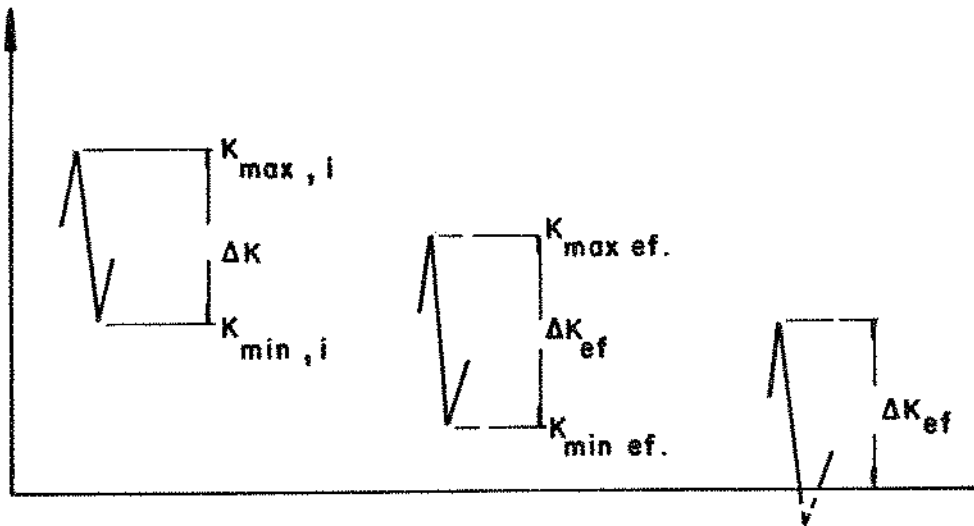


Figura 7 - Representação de  $\Delta K_{ef}$  para o modelo de Willenborg [6].

6. Os valores de  $\Delta K_{ef}$  e  $R_{ef}$  são calculados usando-se as equações (12) e (13):

$$\Delta K_{ef, 2,i} = K_{m\acute{a}x\ ef, 2,i} - K_{m\acute{i}n\ ef, 2,i} \quad (14)$$

$$R_{ef\ 2,i} = \frac{K_{m\acute{i}n\ 2,i} - K_{red}}{K_{m\acute{a}x\ 2,i} - K_{red}} = \frac{K_{m\acute{i}n} + K_{m\acute{a}x\ 2,i} - K_{req}}{2 K_{m\acute{a}x\ 2,i} - K_{req}} \quad (15)$$

A lei de propagação da fissura poderá então ser aplicada, obtendo-se a propagação da trinca durante o ciclo.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K_{ef})^n}{(1 - R_{ef}) K_c - \Delta K_{ef}} \quad (16)$$

Ao final do primeiro ciclo do segundo nível obtemos a 2,1.

7. Comparar o valor corrente a 2,1 com  $a_p$ . Desde que  $a_{2,1}$  seja menor do que  $a_p$ , a progressão da fissura ainda será retardada. Então retornamos ao estágio (3) e obtemos:

$$\sigma_{req} = \frac{\sigma_e}{\beta} \sqrt{\frac{2(a_p - a_{2,1})}{a_{2,1}}}$$

Vemos que  $\sigma_{req}$  decresce à medida que  $a_c$  se aproxima de  $a_p$ . Quando  $\sigma_{req} = \sigma_{m\acute{a}x\ 2,1}$  resulta  $\sigma_{red}=0$  e o retardo não mais será aplicado.

O modelo de Willenborg será utilizado no desenvolvimento deste trabalho e sobre o mesmo serão feitas algumas observações mais adiante.

As pesquisas atuais se voltam para a obtenção de um modelo mais geral, que considere além do efeito do retardo na propagação da trinca, efeitos de carregamento em compressão e seqüências de carregamento baixo-alto.

Prosseguindo na apresentação dos conceitos utilizados em alguns dos modelos matemáticos propostos para representar analiticamente a intensidade do retardo na velocidade de propagação da trinca, como resultado da aplicação de sobrecargas de tração, devemos fazer algumas observações com relação ao "fechamento da trinca".

#### 1.2.1.3 Modelo de Elber

Tem sido aceito, tradicionalmente, que sob carregamento cíclico, a ponta da trinca abre e fecha na carga zero.

Elber [41] observou que durante um carregamento de

amplitude constante, as trincas de fadiga normalmente se fecham quando a carga ainda era de tração e não se abriam novamente até que altas cargas de tração fossem atingidas no ciclo seguinte.

Para explicar o comportamento do fechamento da trinca, vamos nos utilizar da zona plástica que está sempre presente ao redor da ponta da trinca, como pode ser observado na figura 8.

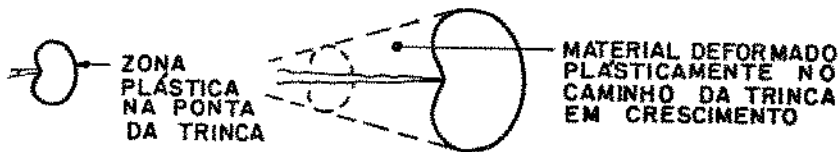


Figura 8 - Representação da zona plástica na ponta da trinca e do "envólucro plástico" deixado no caminho da trinca que está crescendo [12].

Na medida em que a trinca cresce através de uma sucessão destas zonas que aumentam em tamanho com o comprimento da trinca, um envólucro de material deformado plasticamente, no qual estão presentes deformações residuais de tração com as correspondentes tensões residuais de compressão, é deixado no caminho da trinca. As deformações residuais de tração são responsáveis pelo fechamento da trinca ainda sujeito a carregamento de tração e a mesma não se abre até que um carregamento de tração suficientemente alto seja novamente aplicado.

As tensões residuais de compressão existentes no caminho da trinca por fadiga foram confirmadas através de medidas de difração de raios-X.

Em função das observações feitas com relação ao fechamento da trinca sujeita ainda a carregamento de tração e de sua abertura para um carregamento de tração suficientemente alto no ciclo seguinte e, portanto, que a mesma está aberta somente para uma parte do ciclo de carga, Elber propôs que a taxa de crescimento da trinca seja correlacionada com um intervalo intensidade de tensão efetivo,  $\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{op}$ , ilustrado na figura 9, ao invés do intervalo fator intensidade de tensão total,  $\Delta K$ , como vinha sendo feito.

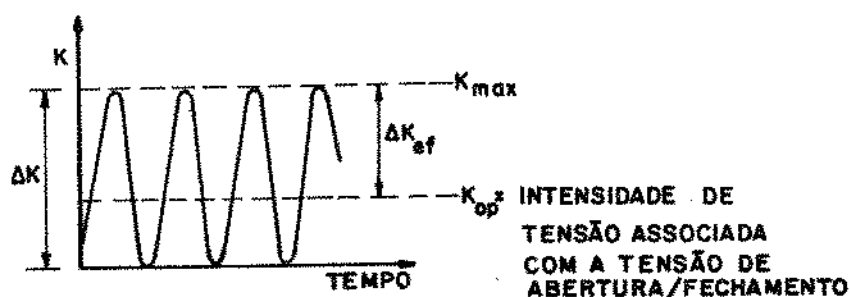


Figura 9 - Intervalo intensidade de tensão efetivo proposto por Elber [41].

É importante salientar o fato de que o conceito da intensidade de tensão efetivo procura, efetivamente, explicar efeitos da seqüência de carregamento na propagação da trinca, sejam os mesmos de retardo ou de aceleração, como pode ser observado através da figura 10.

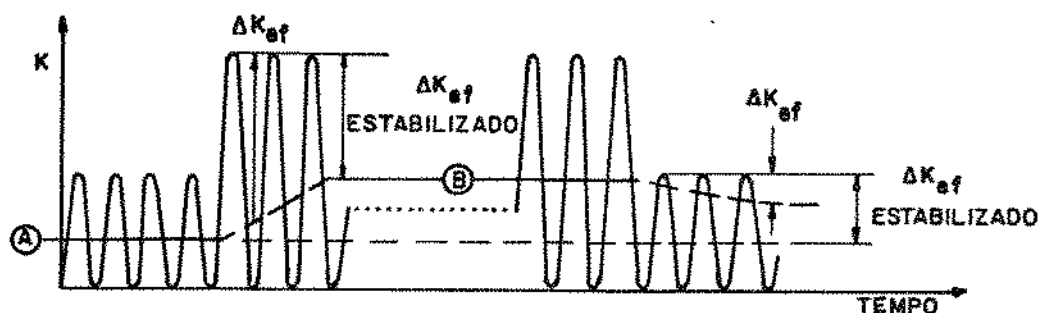


Figura 10 - Representação da variação da intensidade de tensão do fechamento da trinca com a seqüência de carregamento e a correspondente variação em  $\Delta K_{ef}$  |12|.

Fazendo referência à figura 10, suponhamos que  $A$  seja a intensidade de tensão do fechamento associada com o ciclo de carregamento mais baixo e que  $B$  seja a intensidade de tensão do fechamento associada com o ciclo de carregamento de carga mais alta. Na região de transição da carga mais baixa para a carga mais alta, o valor de  $\Delta K_{ef}$  para o nível mais alto será temporariamente maior do que o seu valor estabilizado representado pelo ponto  $B$ , o que causará uma aceleração no crescimento da trinca no nível de carga mais alto. Utilizando o mesmo raciocínio para a região de transição da carga mais alta para a mais baixa, verificamos que  $\Delta K_{ef}$  será menor do que o seu valor estabilizado representado pelo ponto  $A$  causando, portanto, um retardo no crescimento da trinca.

Comentamos anteriormente, que alguns trabalhos evidenciam um efeito de retardo completo não imediatamente após a

aplicação da sobrecarga de tração, mas sim, somente ocorrido um crescimento da trinca por uma distância dentro da zona plástica criada pela sobrecarga. Segundo Elber [41], uma explicação física para o atraso no retardo do crescimento da trinca após a aplicação de uma simples carga alta, pode ser dada pela análise do comportamento da zona plástica deixada pelo ciclo de carga alta na frente da ponta da trinca.

Tensões residuais de compressão atuam na zona plástica como resultado da presença de material elástico ao redor da mesma. Assim, se a região plástica causada pela sobrecarga está na frente da ponta da trinca, não haverá influência das tensões de compressão na abertura da fissura.

Na medida em que a trinca se propaga dentro da zona plástica, estas tensões residuais de compressão vão agir nas novas superfícies de fratura criadas, influenciando esta que aumenta a medida em que a trinca caminha para o interior da zona plástica.

### 1.2.2 Análises Para Carregamentos de Amplitude Variável.

Na tentativa de se prever o comportamento do crescimento da trinca por fadiga sob carregamento de amplitude variável, dois procedimentos gerais tem sido usados. O primeiro, utilizado em carregamentos aleatórios, representa o espectro de carga em termos de parâmetros estatísticos. No trabalho de pesquisa realizado por Barson [43,44], foi possível correlacionar bem a taxa média de crescimento da trinca para as cargas aleatórias por ele estudadas, através da relação  $\frac{da}{dN} = C (\Delta K \text{ rms})^n$ , onde  $\Delta K \text{ rms}$  é o intervalo intensidade de tensão raiz quadrada média (root-mean-square) para uma sequência de carga. São as seguintes as relações para as tensões raiz quadrada média:

$$\sigma_{\text{m\acute{a}x rms}} = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m (\sigma_{\text{m\acute{a}x}})^2 \right|^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma_{\text{m\acute{i}n rms}} = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m (\sigma_{\text{m\acute{i}n}})^2 \right|^{1/2} \quad (18)$$

onde  $\sigma_{\text{m\acute{a}x}}$  e  $\sigma_{\text{m\acute{i}n}}$  s\~ao, respectivamente, as tens\~oes m\~aximas e m\~inimas e  $M$  \~e o n\~umero total de valores de  $\sigma_{\text{m\acute{a}x}}$  ou  $\sigma_{\text{m\acute{i}n}}$ . Uma vez calculados os valores de  $\sigma_{\text{m\acute{a}x rms}}$  e  $\sigma_{\text{m\acute{i}n rms}}$ , pode ser determinada a raz\~ao de tens\~oes raiz quadrada m\~edia,  $R_{\text{rms}}$ , atrav\~es da express\~ao:

$$R_{\text{rms}} = \frac{\sigma_{\text{m\acute{i}n rms}}}{\sigma_{\text{m\acute{a}x rms}} \quad (19)$$

Smith [45] tamb\~em obteve boas correla\~oes com caracteriza\~oes similares para carregamentos aleat\~orios.

A segunda tentativa calcula e soma o crescimento da trinca ciclo por ciclo para carregamentos simulativos de opera\~oes pr\~aticas de servi\~co, que consistem de blocos de ciclos, tendo cada um deles diferentes amplitudes, tens\~oes m\~edias e n\~umero de ciclos. No trabalho de Brussat [46] encontramos previs\~oes para tais tipos de carregamento, levando em considera\~ao efeitos da raz\~ao de tens\~oes desprezando, por\~em, efeitos de seq\~u\~encia de carga. As previs\~oes tendem, de um modo geral, a serem conservativas.

De uma maneira geral, parece que as previs\~oes ciclo por ciclo s\~ao necess\~arias especialmente quando efeitos de seq\~u\~encia de carregamento s\~ao consider\~aveis, o que ocorre com a

presença de altas sobrecargas ocasionais, como as que atuam nas aeronaves em serviço.

Carregamentos simulando operações em serviço são normalmente irregulares, o que torna difícil definir o que vem a ser "um ciclo". Para tais casos, surge a questão de como dados de taxa de crescimento da trinca sob carregamento de amplitude constante podem ser usados para prever a vida do componente.

Foram investigados alguns métodos para se solucionar o problema e foi obtida uma concordância favorável com dados de testes para histórias de carregamentos de amplitude variável [47]. Para uma rápida análise, podemos classificar os vários tipos de carregamento do seguinte modo: sobrecargas, carregamentos em bloco, carregamento em blocos programado, carregamento aleatório e carregamento de simulação de voo [48].

Os estudos que estão sendo realizados com relação ao crescimento da trinca são muitos, pois em adição à história do carregamento, estão presentes outras variáveis adicionais que atuam na velocidade de propagação da trinca. É suficiente mencionarmos as seguintes: tipo de amostra, material, sistema de carregamento (tração, flexão, etc), taxa de carregamento (frequência) e condições ambientais.

A condição tipo de amostra, é geralmente satisfeita pelos valores do parâmetro intensidade de tensão,  $K$ ; entretanto, diferenças entre espécimes espessos e finos são significativos (deformação plana/tensão plana). O efeito das outras variáveis tem sido investigado e uma grande variedade de resultados podem ser encontrados na literatura especializada [49-62].

Na ausência de leis matemáticas absolutamente corre



tas, uma solução prática é a obtenção de comportamentos empíricos. Uma tentativa mais rigorosa é o desenvolvimento, através de dados experimentais, de equações teóricas que melhor representem o comportamento, o que nos leva a uma análise de regressão de múltiplas variáveis. Um exemplo do procedimento exposto, foi sugerido por Simpkins, Neulieb e Golden [63], para carregamentos de simulação de vôo. A função regressão proposta é a da seguinte forma:

$$N = D. (\sigma^2)^a. (\bar{S}_{lg})^b. (\bar{n})^c. (1-\bar{z})^d \quad (20)$$

onde:

- D - constante
- $\sigma^2$  - é a variância do espectro de carga em vôo.
- $\bar{S}_{lg}$  - é a tensão média em vôo
- $\bar{n}$  - é o número médio de ciclos por vôo
- $\bar{z}$  - é a média de  $S_{mín}$  do ciclo solo-ar, dividido por  $S_{lg}$

A equação (20) leva em consideração quatro variáveis independentes que supostamente caracterizam a severidade do espectro de carga. As constantes D, a, b, c e d são determinadas por uma análise de regressão aplicada aos dados experimentais. O resultado fornecido pela equação (20) é a vida em fadiga, N, sob carregamento de simulação de vôo. Uma análise semelhante foi proposta para carregamento aleatório.

Com relação à propagação da trinca por fadiga, para a obtenção de um modelo derivado de resultados empíricos, é necessário conhecer as variáveis independentes que efetivamente caracterizam a história do carregamento, e para isso é indispensável uma grande quantidade de dados experimentais.

As pesquisas com relação à propagação da trinca por fadiga podem ser agrupadas em diferentes categorias; três das quais, frequentemente reconhecidas pela literatura, são:

1. desenvolver o entendimento básico dos mecanismos de crescimento da trinca por fadiga sob carregamento de amplitude variável.

2. testar modelos de crescimento da trinca.

3. obter dados experimentais, dos quais comportamentos empíricos podem ser obtidos.

Os estudos realizados com o objetivo de se conhecer o efeito de sobrecargas e de carregamento em blocos na propagação da trinca por fadiga, podem ser incluídos na primeira categoria, e hoje é possível se afirmar que já existe um certo nível de conhecimento dos mecanismos envolvidos. Pesquisas desenvolvidas com carregamentos programados, carregamentos aleatórios ou carregamento de simulação de voo são incluídos na segunda e terceira categorias.

Os resultados mais importantes observados com relação aos efeitos de interação nos ensaios com sobrecargas e com carregamento em blocos já foram apresentados; porém, durante uma sequência complexa de carregamento é mais difícil se observar, separadamente, os efeitos de interação local. O efeito global, entretanto, pode ser facilmente deduzido através de medidas macroscópicas do crescimento da trinca [48]. A taxa de crescimento prevista sem efeitos de interação, é obtida da curva de crescimento da trinca,

$$a = a_0 + \sum \Delta a_i \quad (21)$$

onde:  $\Delta a_i$  - extensão da trinca em um ciclo,

$$\frac{da}{dN} = f_R ( \Delta K ) \quad (22)$$

Em quase todos os trabalhos de pesquisa desenvolvidos sobre o assunto, é observado que os valores experimentais do comprimento da trinca são diferentes dos obtidos pelos modelos teóricos testados. A seguir é apresentado um resumo das principais conclusões observadas.

a) Taxas de propagação da trinca derivadas das curvas de crescimento da mesma são geralmente menores do que os valores fornecidos pelas equações (21) e (22) [46]. Valores de duas a oito vezes menores foram encontrados, o que se deve, aparentemente, aos efeitos do retardo na propagação da trinca por fadiga.

b) Em ensaios programados, foram encontrados efeitos de seqüência similares aos observados em carregamentos de blocos [37]. Mais especificamente, foi observado um retardo no crescimento da trinca após uma diminuição na amplitude de tensão. Nos testes com seqüência de carregamento baixo-alto-baixo, a taxa de crescimento da trinca na seqüência descendente era menor do que na seqüência ascendente do programa.

c) O efeito de cargas altas é similar aos efeitos de sobrecargas em carregamentos de amplitude constante. Em ensaios de simulação de vôo, foi verificado que a presença de cargas altas, pode ocasionar um decréscimo sensível na taxa de propagação da trinca por fadiga [54]. Sobrecargas aplicadas a uma estrutura pode reduzir, drasticamente, o subsequente crescimento da trinca.

O que pode ser concluído das observações feitas é que acelerações e retardos em um carregamento complexo, são conseqüências da aplicação de cargas variáveis. A aceitação da hipótese de que carregamentos aleatórios e carregamentos equivalentes programados podem fornecer a mesma taxa de crescimento da trinca, deve ser feita com reservas.

Analisando ainda a utilização de dados de crescimento da trinca por fadiga sob carregamento de amplitude constante em corpos de prova com fissura central, para prever o crescimento da trinca por fadiga nos mesmos espécimes sujeitos a um carregamento aleatório puro, podemos referenciar alguns trabalhos de pesquisa [64-69] que empregando procedimentos independentes, fizeram as previsões com as razões das vidas previstas pelas vidas experimentais variando no intervalo de 0,58 a 2,52; com a maior parte bem próxima de um.

A seguir vamos fazer um resumo das principais conclusões observadas com relação à influência do carregamento na taxa de propagação da trinca por fadiga.

1. As taxas de crescimento de uma trinca por fadiga não podem ser preditas sem o conhecimento da história do carregamento ocorrendo em serviço. Uma função de distribuição estatística dos picos de carga é insuficiente e a obtenção das seqüências de carga é fundamental.

2. Durante o crescimento da trinca sob carregamento de amplitude variável, podem ocorrer significativos efeitos de interação. Tem sido amplamente estudados e relatados, retardos e acelerações na taxa de crescimento de uma trinca por fadiga, através de ensaios com carregamentos simples (sobrecargas, carregamento em blocos); porém, resultados análogos foram observa

dos em testes com seqüências de carregamento mais complexos (carregamento aleatório, carregamento programado e carregamento de simulação de voo).

3. Vários mecanismos podem contribuir para tais efeitos de interação e é difícil separar a parte que cabe a cada um dos mesmos; porém, tem sido mostrado que o fechamento da trinca atua de maneira significativa no quadro da acumulação de dano durante o crescimento da trinca sob carregamento de amplitude variável.

4. Como os efeitos de interação são muito sensíveis à seqüência das cargas aplicadas, não fornecem bons resultados as equivalências entre complexos espectros de carga e carregamentos simplificados, por exemplo, carregamento programado. Só podem ser obtidos resultados confiáveis se histórias reais de carregamento são simuladas.

5. Para carregamento aleatório, um certo sucesso tem sido conseguido com a aplicação de  $\Delta K$  rms.

6. Sem dúvida alguma, resultados interessantes podem ser obtidos pela análise de regressão de múltiplas variáveis; o que ocorre, entretanto, é a insuficiência de dados empíricos que nos indiquem as variáveis independentes realmente representativas dos carregamentos de amplitude variável.

7. Há uma crescente tentativa de se desenvolver modelos teóricos que descrevam a taxa de crescimento de uma trinca por fadiga submetida a um carregamento complexo, através de dados obtidos com carregamento de amplitude constante. Bons resultados tem sido conseguidos.

### 1.3. OBJETIVO

A maior parte dos artigos técnicos publicados na literatura especializada que estudam os efeitos de algumas variáveis na taxa de propagação da trinca por fadiga, o fazem no estado plano de deformações; ou seja, com espécimes de grande espessura. Poucos dados experimentais tem sido obtidos em ensaios com amostras de pouca espessura, isto é, no estado plano de tensões, em parte devido a dificuldades experimentais.

O trabalho a ser desenvolvido nesta pesquisa tem como objetivo estudar os principais efeitos provocados por carregamentos de amplitude variável, em amostras de uma liga de alumínio 2024-T3, de espessura fina.

Para a obtenção de um modelo teórico que forneça a taxa de crescimento da trinca por fadiga submetida a um carregamento de amplitude variável, é fundamental conhecer e quantificar os seguintes efeitos:

1. Aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de seqüência ascendente.

2. Retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de seqüência descendente.

3. O efeito de cargas de tração de amplitude menor do que as esperadas em serviço, na redução do retardo no crescimento da trinca.

## C A P Í T U L O II

## 2.1 ANTECEDENTES

Como já foi discutido na introdução teórica do presente trabalho, nos primeiros anos da década de 1970 foram desenvolvidos três conceitos extremamente significativos no estudo da propagação da trinca por fadiga em carregamentos de amplitude variável. Estes conceitos que procuram representar analiticamente o fenômeno do retardo no crescimento da fissura, observado experimentalmente sob certas condições, são conhecidos como o modelo de Wheeler, o modelo de Willenborg e o modelo de Elber (ou fechamento da trinca) e permitem prever o comprimento da trinca estando a estrutura submetida a um espectro de carga mais real.

O modelo de Wheeler é caracterizado por um parâmetro de forma,  $m$ , que deve ser determinado experimentalmente para cada condição do material, carregamento e ambiente. O modelo de Willenborg por sua vez, não incorpora um fator de forma empírico, mas usa o limite de escoamento do material para a determinação do tamanho da zona plástica empregada no cálculo do retardo no crescimento da trinca. Uma das limitações do modelo de Willenborg é que o mesmo só quantifica o efeito do retardo na taxa de propagação de uma trinca por fadiga. O modelo de Elber é baseado no fenômeno do fechamento da trinca e utiliza um fator intensidade de tensão efetivo cuja determinação é função da tensão necessária para abrir a trinca. O fator de fechamento no modelo de Elber é determinado experimentalmente através de resultados empíricos obtidos de ensaios com carregamentos de amplitude constante.

Trabalhos mais recentes tem mostrado que vários parâmetros de carga não presentes nos modelos de Wheeler e de Willenborg, tais como a aceleração no crescimento da trinca e a redução no retardo devido a certos níveis de subcarga, tem um efeito significativo na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de amplitude não constante.

A necessidade de se desenvolver uma metodologia, que considere e quantifique os efeitos de interação para prever o crescimento da trinca vem do fato de que estruturas nas quais fissuras estão presentes, são normalmente submetidas a espectros de carga responsáveis pela ocorrência da aceleração, do retardo e do efeito de subcargas na taxa de propagação da trinca por fadiga. Simplesmente não considerar o efeito do retardo no crescimento da trinca causado por uma sobrecarga de tração, pode ocasionar em termos de projeto, um aumento desnecessário de peso e de custo; por outro lado, considerando-o, é fundamental conhecer as variáveis que durante um carregamento podem aumentar ou diminuir o número de ciclos de retardo. Do mesmo modo que o retardo no crescimento da trinca é responsável por um ganho significativo na vida residual do componente, trabalhando assim a favor da segurança, não incluir na análise os efeitos da aceleração e da redução do retardo causados pelo carregamento, terá como consequência a obtenção de um projeto inseguro.

Um outro problema que se encontra pesquisando a literatura especializada, é a ausência de dados empíricos de crescimento de uma trinca por fadiga em ensaios realizados com chapas finas. Uma grande parte dos resultados experimentais obtidos são resultados de ensaios com chapas grossas.



Não se pode negar a importância, em termos de aplicações em estruturas mecânicas principalmente na indústria aeroespacial, de chapas de pequena espessura, uma vez que os parâmetros resistência, segurança, peso e custo são decisivos neste campo de atividades.

Assim, o trabalho que aqui será apresentado tem como objetivo conhecer e quantificar através de modelos teóricos, usando para isto a equação de Forman e o modelo de Willenborg, todos os principais efeitos de interações encontrados em um carregamento de amplitude variável em chapas finas de uma liga de alumínio 2024-T3, procurando assim conhecer mais profundamente o problema da influência do espectro de carga na vida total de um componente estrutural confeccionado de chapas finas.

## C A P Í T U L O    I I I

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

## 3.1 MATERIAL

O material utilizado no desenvolvimento experimental do trabalho foi uma liga de alumínio 2024-T3, na forma de chapas, com a espessura de 1,27mm. A composição química esperada da mesma apresenta-se na tabela 1.

Liga	Silício	Cobre	Manganês	Magnésio	Cromo	Níquel	Zinco	Titânio
2024	-	4,4	0,6	1,5	-	-	-	-

Tabela 1 - Composição química da liga de alumínio 2024-T3

## 3.2 CORPOS DE PROVA

## 3.2.1. Corpo de prova para o ensaio de tração.

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram con

feccionados de acordo com a NB-4 da ABNT. A figura 11 mostra a forma e dimensões dos corpos de prova que foram utilizados.

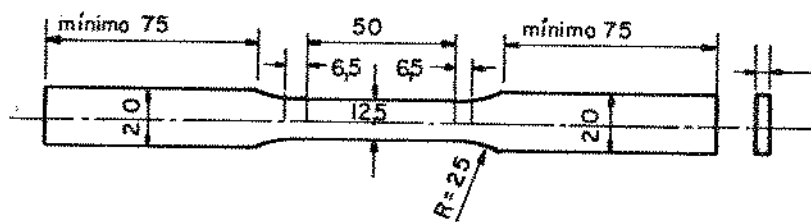


Figura 11 - Forma e dimensões (mm) dos CDPs para os ensaios de tração.

Na tabela 2 estão indicadas as propriedades mecânicas da liga empregada.

Límite de escoamento, MPa	417
Límite de resistência à tração, MPa	516
Alongamento, %	8,6

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024-T3.

### 3.2.2 Corpo de prova para o ensaio de fadiga.

Os corpos de prova utilizados no trabalho são para ensaios de fadiga por tração-compressão, com a forma e dimensões indicadas na figura 12.

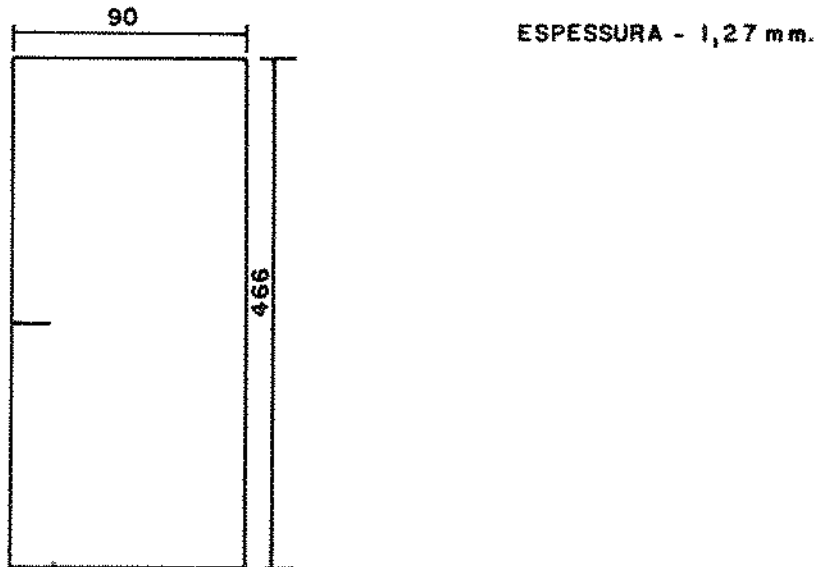


Figura 12 - Forma e dimensões (mm) dos CDPs utilizados nos ensaios de fadiga.

Durante o desenvolvimento teórico da mecânica da fratura foi admitida, para a definição de  $K_I$ , uma distribuição uniforme da tensão axial aplicada a uma certa distância da fissura. No corpo de prova apresentado na figura 12, (Single Edge Notch Specimen) a carga externa é aplicada de forma concentrada através de um pino transversal ao plano da placa. Portanto, para refazer a hipótese inicial para  $\sigma_\infty$ , é necessário uma distribuição uniforme da carga em uma seção transversal a uma certa distância da fissura.

O estudo desenvolvido por B. Gross [70] indica quão próximo do plano da fissura poderá ocorrer a difusão completa do carregamento para confirmar a hipótese de  $\sigma_\infty$  ser aplicada a uma distância remota da mesma e não influenciar o valor de  $K_I$ .

A determinação do espécime representado na figura 12 e utilizado no procedimento experimental deste trabalho de pesquisa foi feita por O.Perez [71] que obtém, para a geometria

da amostra ensaiada, as condições necessárias para aplicar os conceitos da mecânica da fratura.

Os corpos de prova foram retirados na direção de laminação da chapa e o entalhe iniciador da trinca por fadiga, que em todas as amostras apresentou uma dimensão próxima de 5,0 mm, foi feito por intermédio de uma pequena serra.

Os espécimes eram então submetidos aos ensaios de fadiga, com um monitoramento constante através do microscópico para se observar o aparecimento da fissura e sua propagação até um comprimento de 6,00 mm, quando então foram desenvolvidos os programas de ensaio que serão apresentados a seguir.

O fator de correção de Gross [70] foi usado nos cálculos do fator intensidade de tensão para esta geometria de espécime; assim:

$$K = \sigma \sqrt{a} \left[ 1,99 - 0,41 (a/w) + 18,70 (a/w)^2 - 38,48 (a/w)^3 + 53,85 (a/w)^4 \right]$$

### 3.3 EQUIPAMENTO

Os ensaios de fadiga foram realizados num sistema eletro-hidráulico de malha fechada para ensaios estáticos e dinâmicos, com capacidade de mais ou menos 10 toneladas, modelo 810.12, fabricado pela MTS Systems Corporation.

As leituras do comprimento da trinca, realizadas durante os ensaios de fadiga, foram feitas com o auxílio de um microscópio, com um aumento de 7 vezes, acoplado a uma escala graduada, como pode ser observado na figura 13. A precisão da

leitura foi de centésimo de milímetro. A frequência dos ensaios foi de 10 Hz.



Figura 13 - Leitura do comprimento da trinca.

## C A P Í T U L O I V

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 4.1 PROGRAMA DE TRABALHO

Para atingir o objetivo do trabalho, isto é, quantificar através de modelos matemáticos os efeitos de carregamentos de amplitude variável na taxa de propagação de uma trinca por fadiga, foram desenvolvidos seis programas de ensaio cujos objetivos, de maneira resumida, foram os seguintes:

a) Primeiro Programa de Ensaios. Teve como finalidade de estudar o material base e definir os níveis de carga a serem empregados.

b) Programa Intermediário de Ensaios. O objetivo foi analisar o efeito de carregamentos de seqüência ascendente e descendente na taxa de propagação da trinca por fadiga e ter um primeiro contato com a aceleração e com o retardo na velocidade de crescimento da mesma.

c) Segundo Programa de Ensaios. Conhecido o material e definidos os níveis de carregamento a serem usados, foi idealizado este Programa que teve como objetivo estudar e possibilitar o modelamento da aceleração e do retardo na propagação da trinca.

d) Terceiro Programa de Ensaios. Teve por finalidade analisar em detalhe os efeitos do tamanho da zona plástica no efeito do retardo na propagação da trinca. Para isto foi feito um programa similar ao item c, mudando os intervalos de aplicação da carga.

e) Quarto Programa de Ensaios. Realizado na frequência de 1 HZ, (sendo que nos programas anteriores a frequência de trabalho utilizada foi de 10 HZ) visou a determinação do mecanismo de aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga no carregamento de sequência ascendente.

f) Quinto Programa de Ensaios. O objetivo deste programa foi estudar e modelar a redução no retardo do crescimento da fissura devido a cargas aplicadas após a sequência de carregamento alto-baixo.

Uma vez apresentados os Programas de Ensaios que serão executados vamos a seguir, com o auxílio dos resultados fornecidos pelos mesmos, analisar individualmente cada um dos efeitos de interação a serem estudados, a aceleração, o retardo e a presença de cargas de tração após a sequência descendente de carregamento, com seus respectivos resultados, modelo teórico e conclusões.

#### 4.2 PRIMEIRO PROGRAMA DE ENSAIOS

O primeiro programa de ensaios realizado teve como objetivo conhecer o material a ser trabalhado e especificar os níveis de carga a serem usados nos programas de ensaios subsequentes; o que pode ser observado nas figuras 14 a 23, que representam as curvas comprimento da trinca versus número de ciclos, até a ruptura do corpo de prova.

Como o objetivo do trabalho é estudar os efeitos de interação resultantes de carregamentos da amplitude variável na taxa de propagação de uma trinca por fadiga, foi necessário determinar experimentalmente dois níveis limites de sobrecargas,



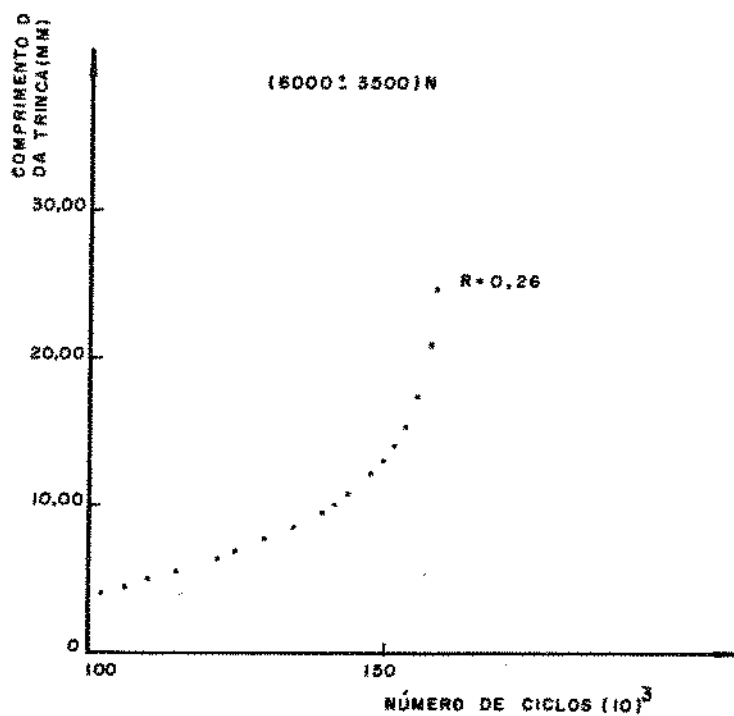


Figura 14 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(6000 ± 3500) N

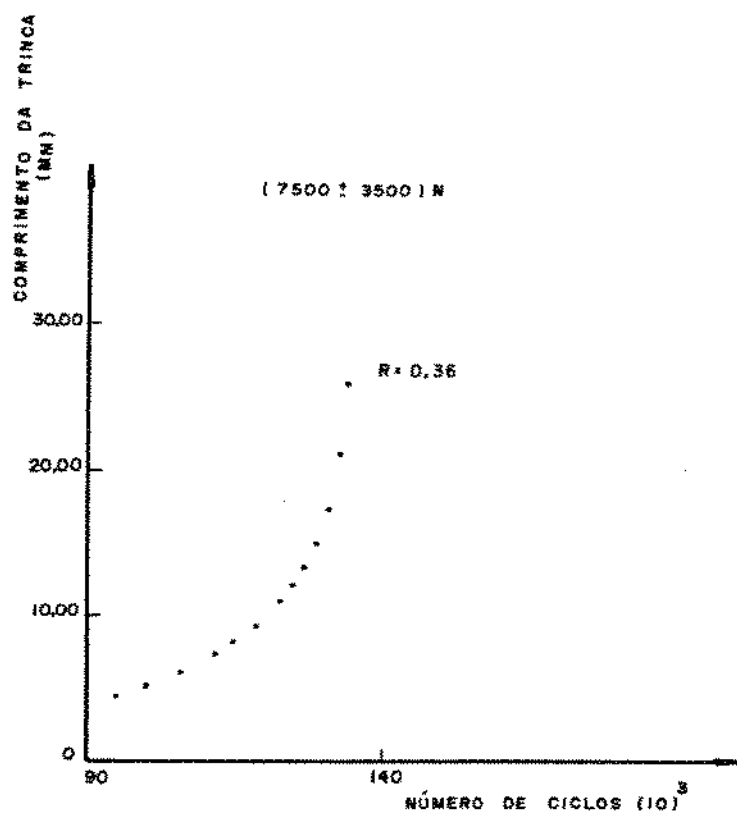


Figura 15 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(7500 ± 3500) N

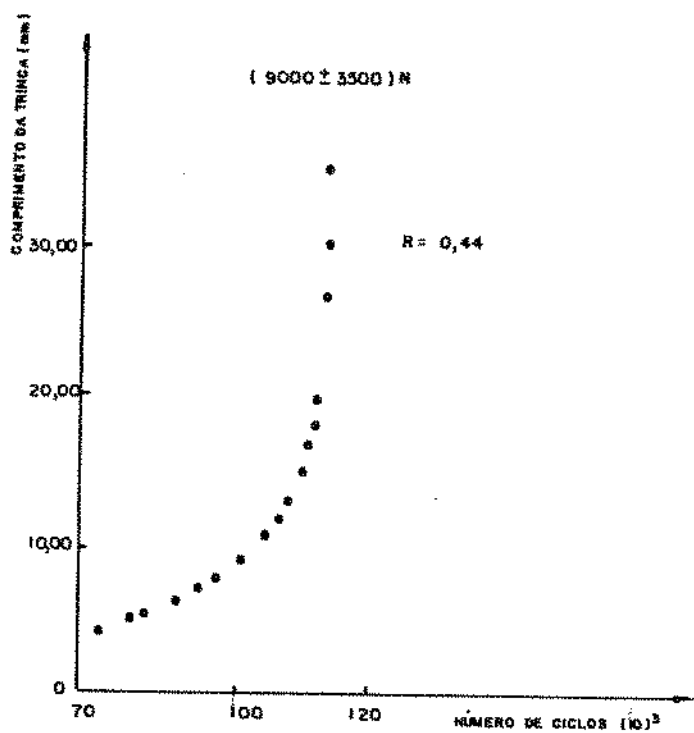


Figura 16 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(9000 ± 3500) N

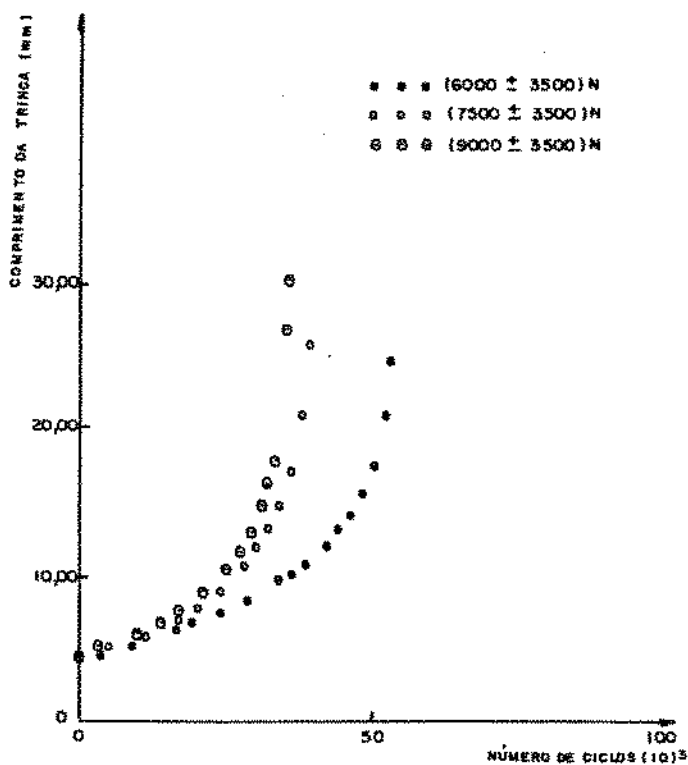


Figura 17 - Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos.

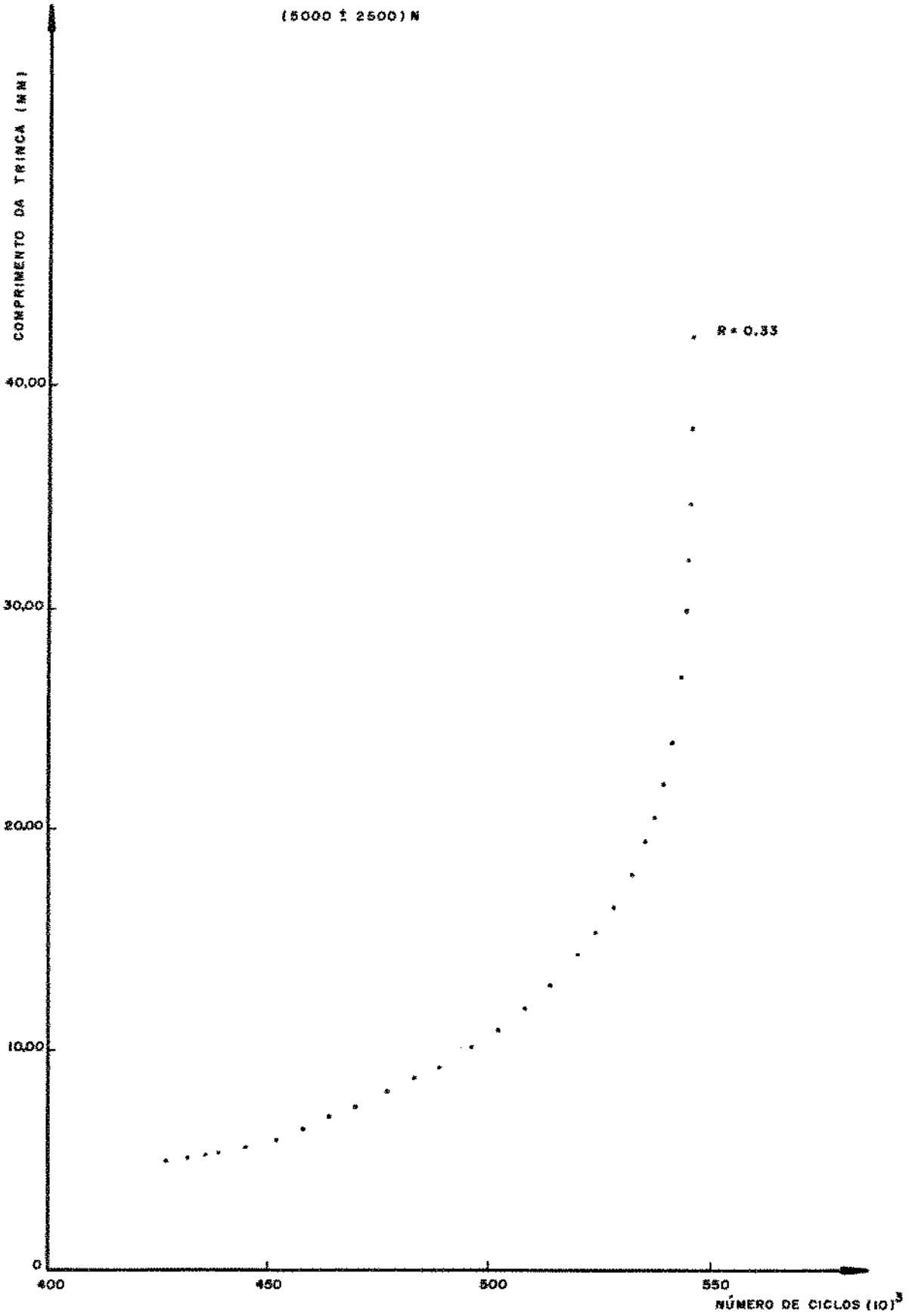


Figura 18 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N

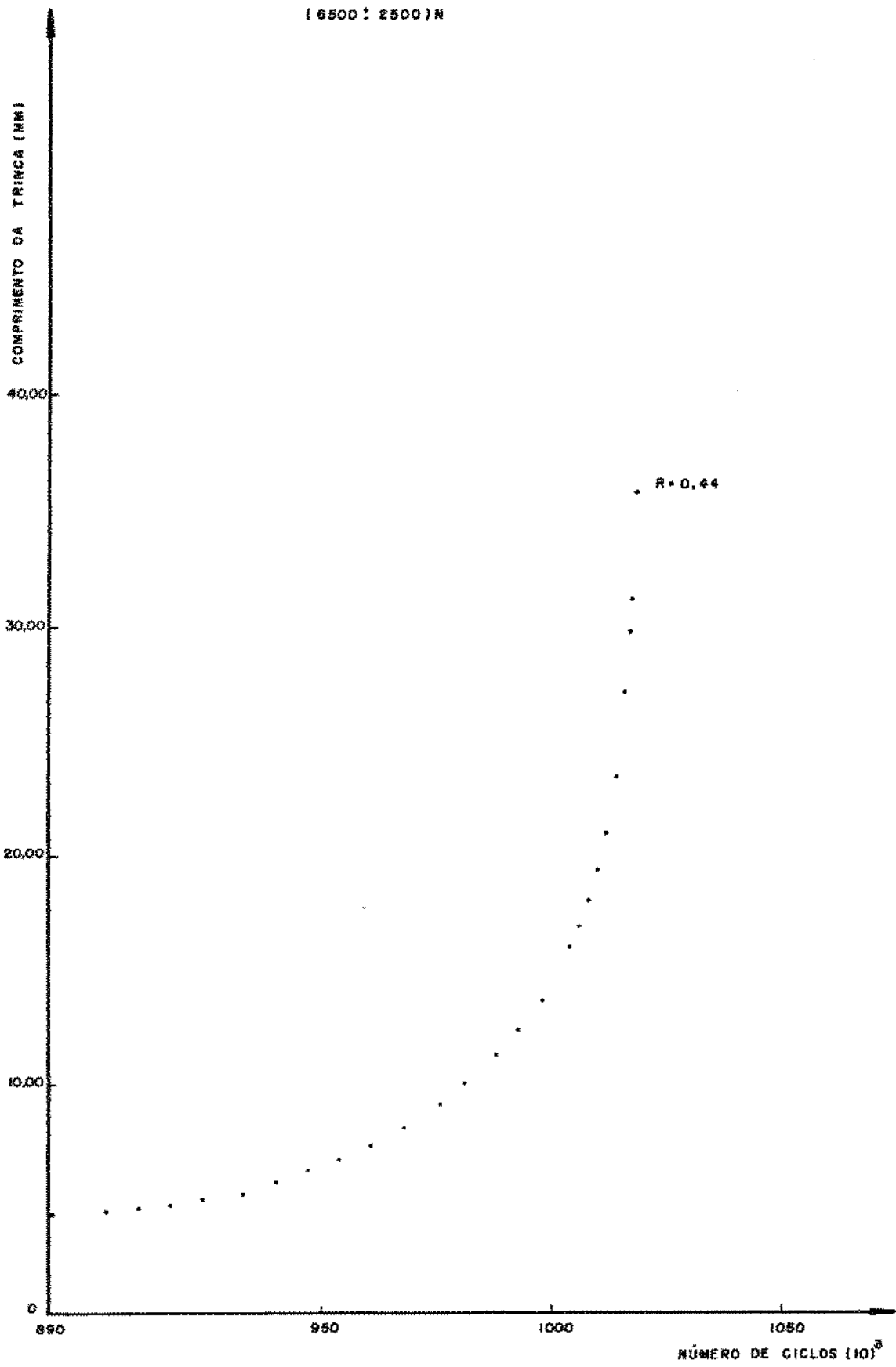


Figura 19 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(6500 ± 2500)N

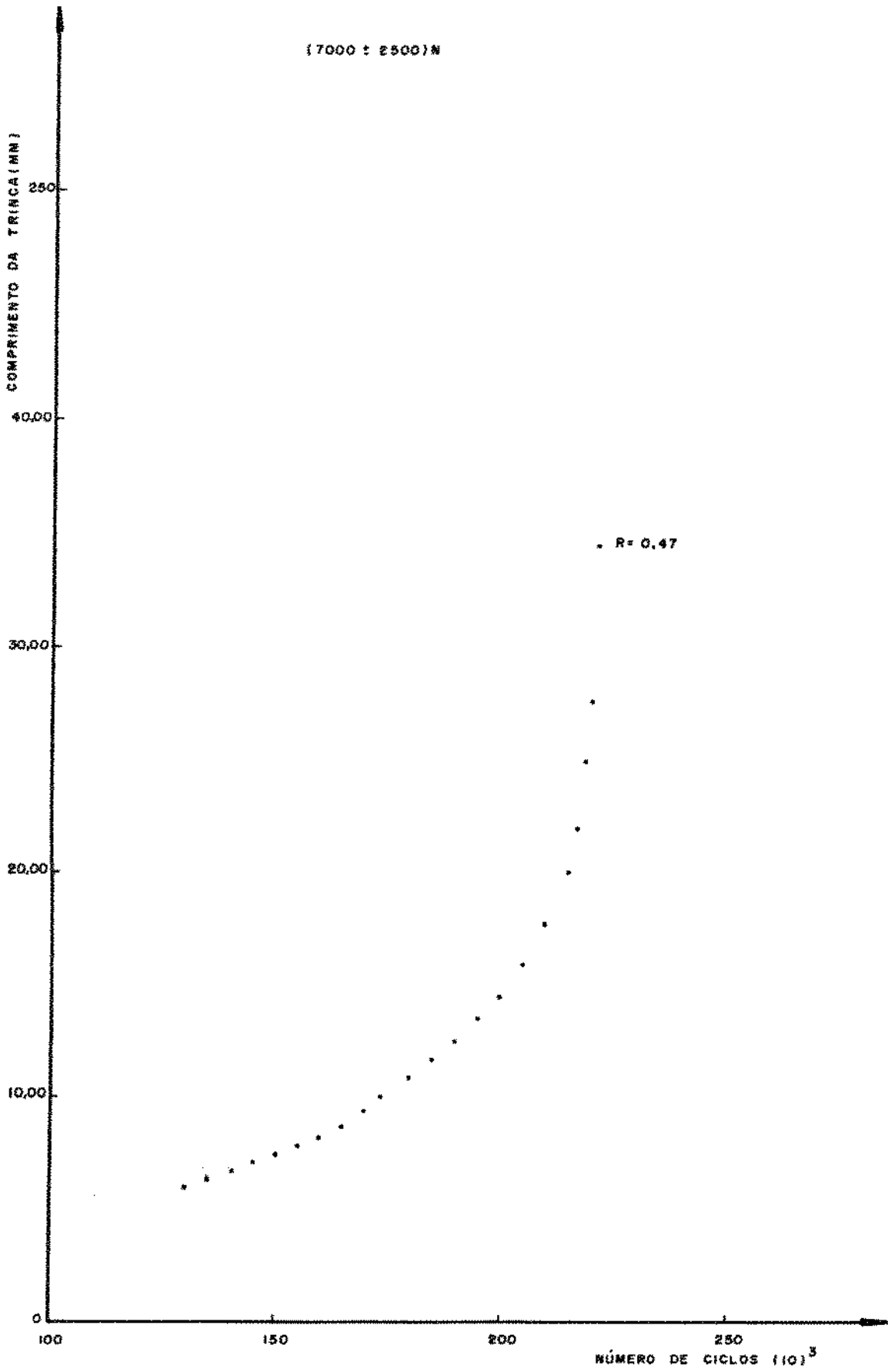


Figura 20 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(7000±2500)N

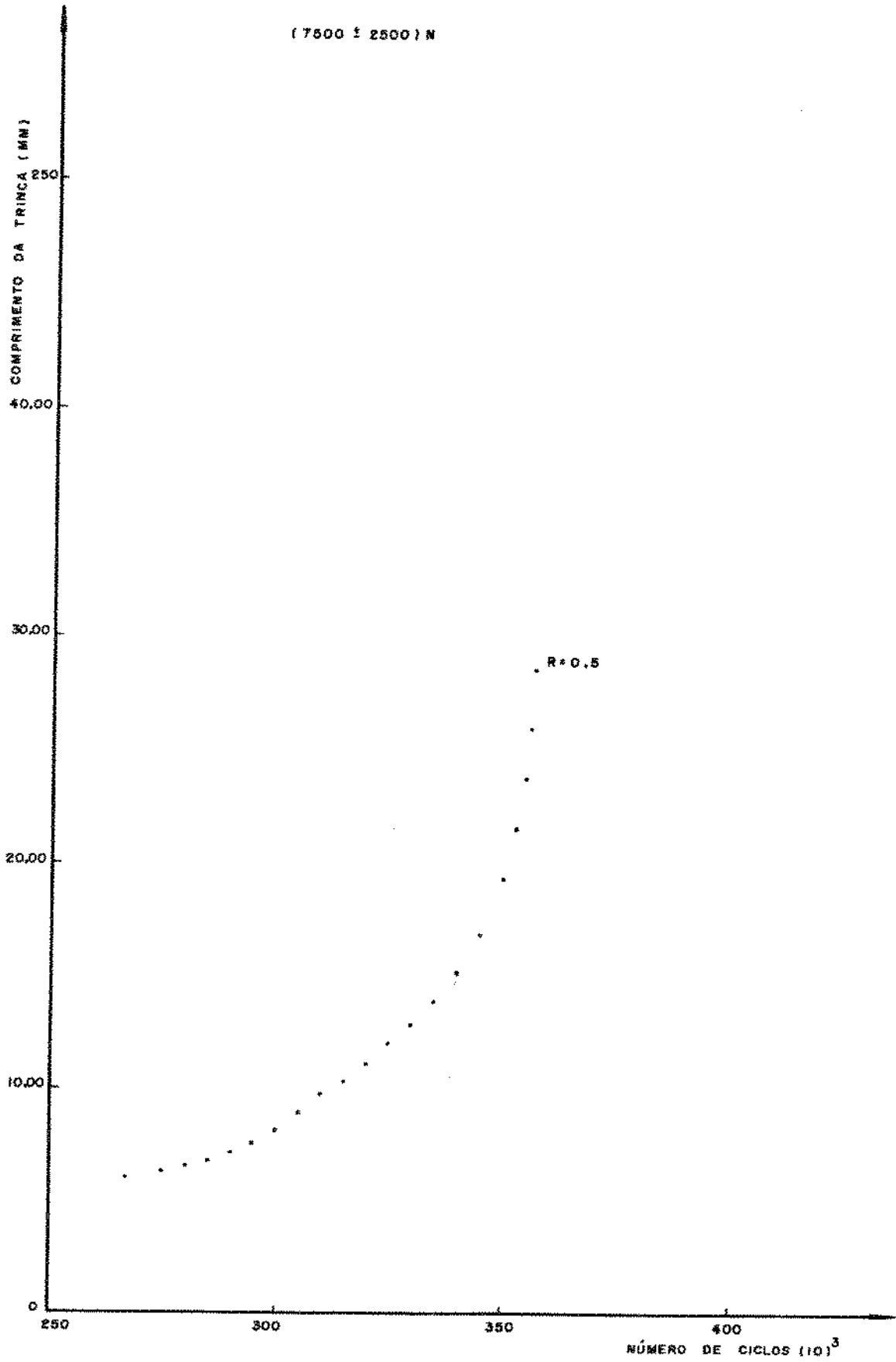


Figura 21 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(7500±2500)N

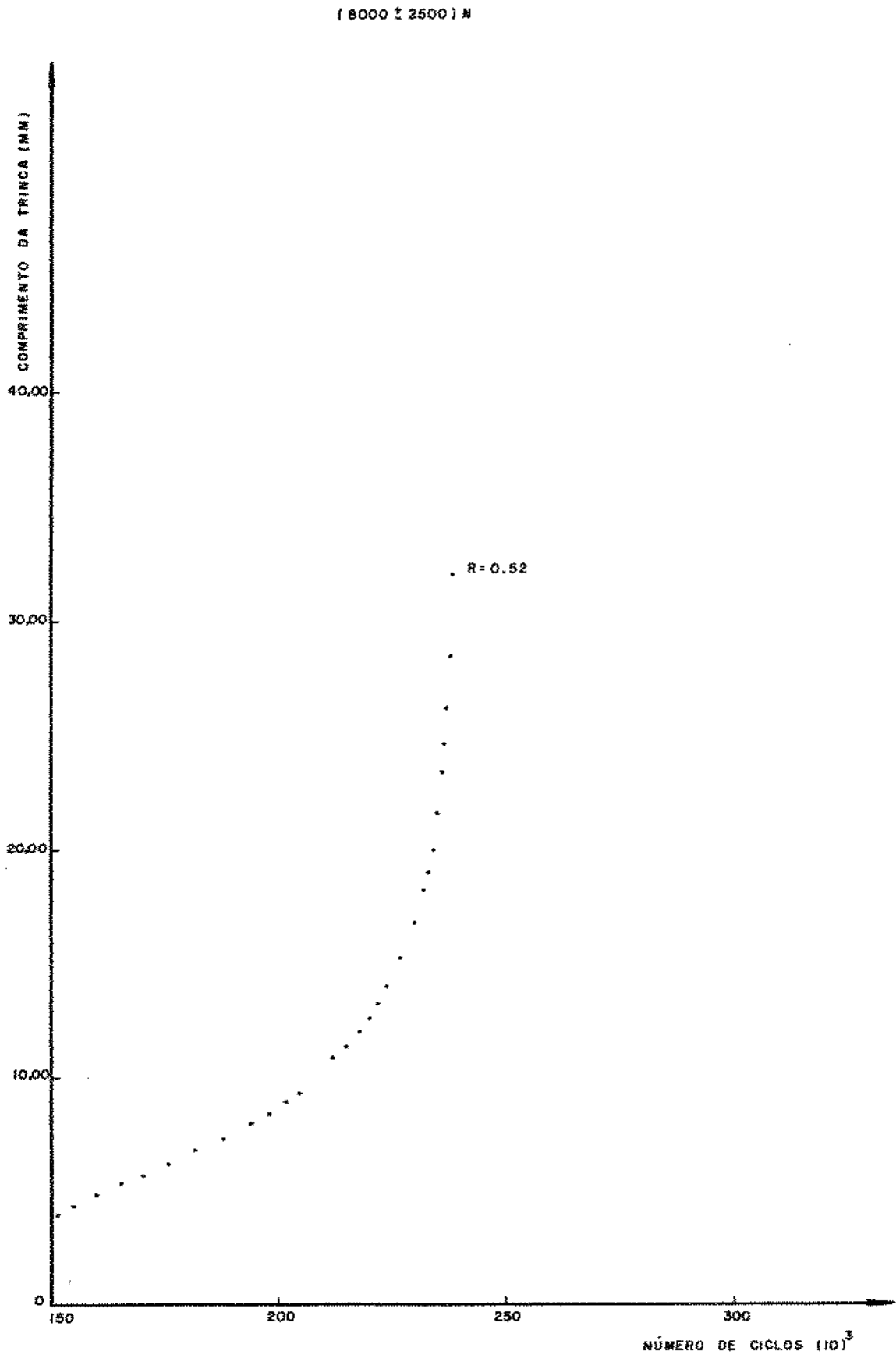


Figura 22 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(8000±2500)N

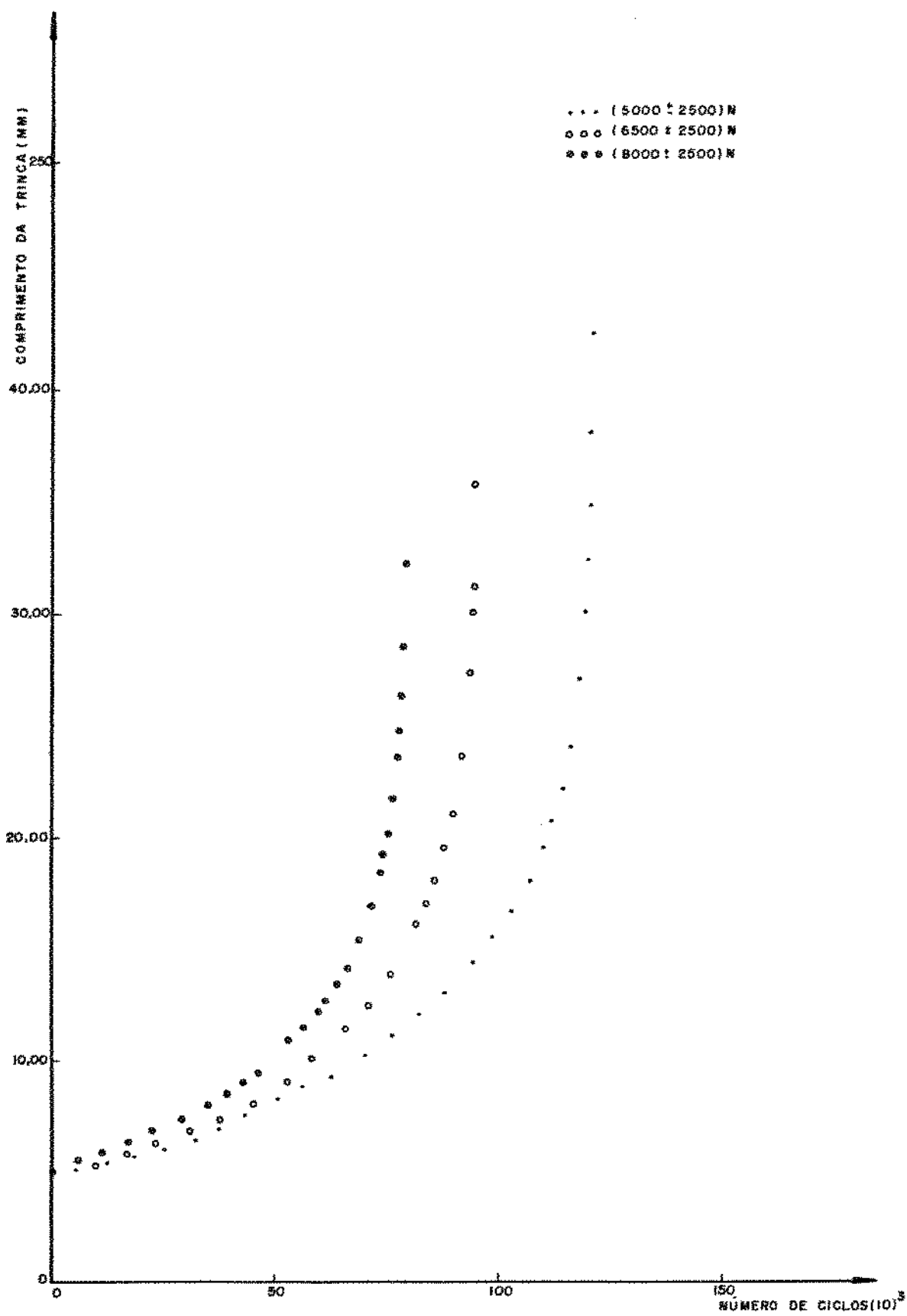


Figura 23 - Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos.



que juntamente com a carga de referência nos fornecem dois parâmetros de projeto do material ensaiado.

Vamos definir carga de referência como sendo o valor de carregamento a partir do qual ocorrerão as cargas de seqüência ascendente e para onde voltarão as cargas de seqüência descendente.

O primeiro valor de sobrecarga a ser determinado é aquele que pode ser definido como sendo o limite mínimo para o qual, no retorno à carga de referência, ainda ocorre o retardo no crescimento da trinca por fadiga. Na figura 24 podemos observar uma representação esquemática que representa este caso.

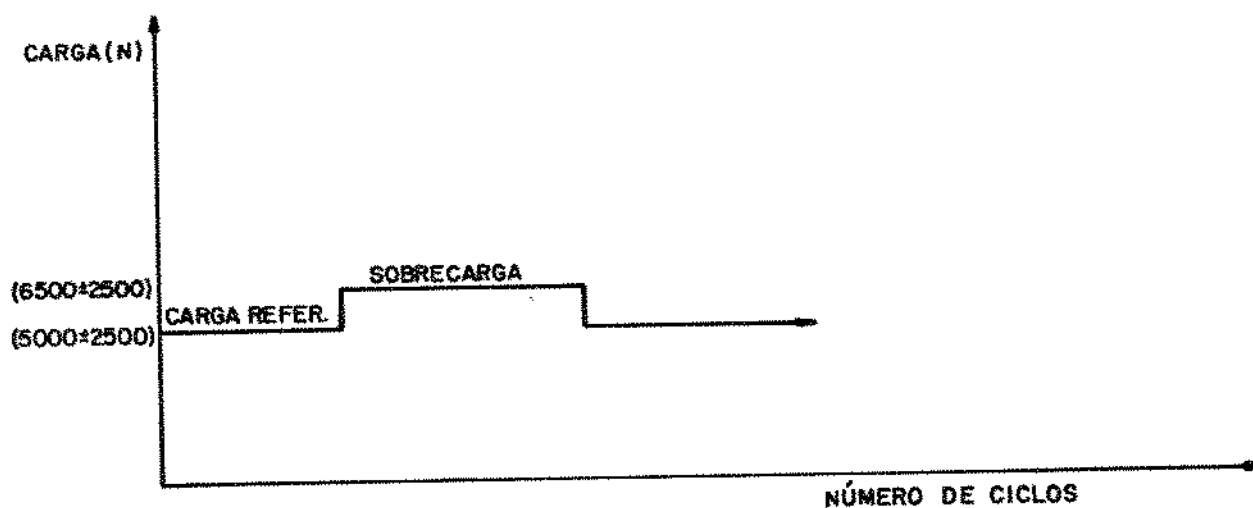


Figura 24 - Relação entre a sobrecarga e a carga de referência para a qual ainda ocorre o retardo no crescimento da trinca.

O quociente entre o fator intensidade de tensão máximo na sobrecarga ( $K_{m\acute{a}x Sc}$ ) e o fator intensidade de tensão máximo na carga de referência ( $K_{m\acute{a}x Cr}$ ),  $\frac{K_{m\acute{a}x Sc}}{K_{m\acute{a}x Cr}}$ , assume o valor 1,20, que representa, portanto, o mínimo valor para esta relação para a qual ainda ocorre o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga; para  $\frac{K_{m\acute{a}x Sc}}{K_{m\acute{a}x Cr}} < 1,20$ , não haverá o retardo no crescimento da trinca no retorno da sobrecarga para a carga de referência. O valor  $\frac{K_{m\acute{a}x Sc}}{K_{m\acute{a}x Cr}} = 1,20$  é parâmetro de projeto extremamente importante para o material ensaiado, submetido a um carregamento de amplitude não constante.

Como a literatura faz referência a valores de sobrecarga que no retorno à carga de referência podem inibir totalmente o crescimento da trinca [12], resta-nos, para o material estudado, determinar este valor; ou seja, obter a relação  $\frac{K_{m\acute{a}x Sc}}{K_{m\acute{a}x Cr}}$  que causa uma parada completa na propagação da trinca por fadiga. Na figura 25 está representado um esquema que ilustra essa situação.

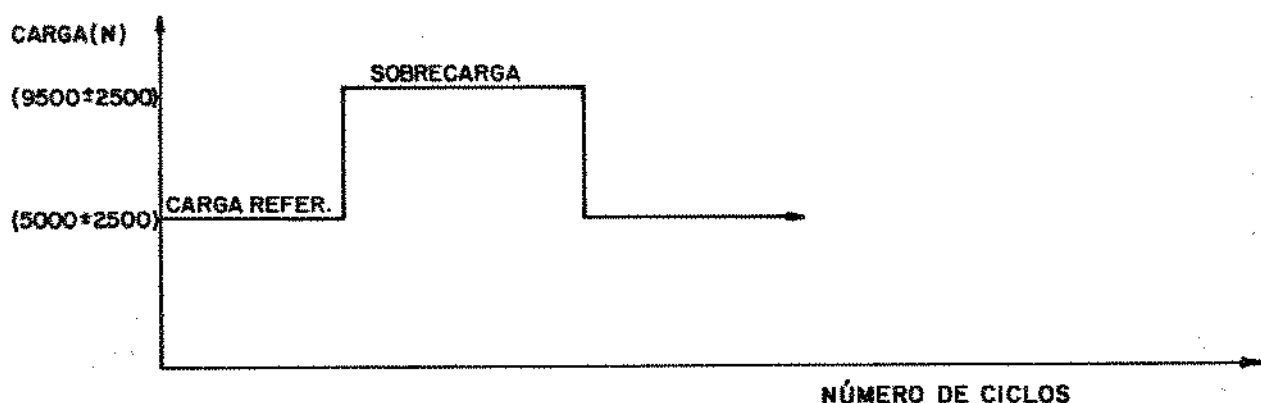


Figura 25 - Relação entre a sobrecarga e a carga de referência para a qual ocorre uma parada completa no crescimento da trinca.

O quociente entre o fator intensidade de tensão máximo na sobrecarga e o fator intensidade de tensão máximo na carga de referência,  $\frac{K_{m\acute{a}x} Sc}{K_{m\acute{a}x} Cr}$  igual a 1,60, também é um parâmetro de projeto, pois indica para o material ensaiado, o valor da sobrecarga que pode causar uma parada completa no crescimento da trinca por fadiga.

Os resultados dos ensaios realizados com a finalidade de se determinar os valores limites das relações entre os fatores intensidade de tensão, podem ser observados através das figuras 26 a 30, que mostram o crescimento da trinca após o retorno da sobrecarga para a carga de referência no comprimento da trinca de 16,00 mm, para os quocientes  $\frac{K_{m\acute{a}x} Sc}{K_{m\acute{a}x} Cr}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33, 1,40 e 1,60.

Na figura 31 podemos observar a alteração na inclinação da curva a x N, quando ocorre a passagem da carga de referência para a sobrecarga. No ensaio considerado, a carga de referência foi de (5000 ± 2500)N, a sobrecarga assumiu o valor (8000 ± 2500)N e o carregamento de seqüência ascendente ocorreu para o comprimento da trinca de 12,23mm. Na figura 31 está representado também o comportamento da curva comprimento da trinca versus número de ciclos para a carga de referência, caso não houvesse ocorrido a sobrecarga.

O mecanismo da aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga está relacionado à passagem da carga de referência para a sobrecarga, no carregamento de seqüência ascendente e será estudado detalhadamente nos programas a serem realizados, assim como o efeito das cargas que tendem a diminuir a

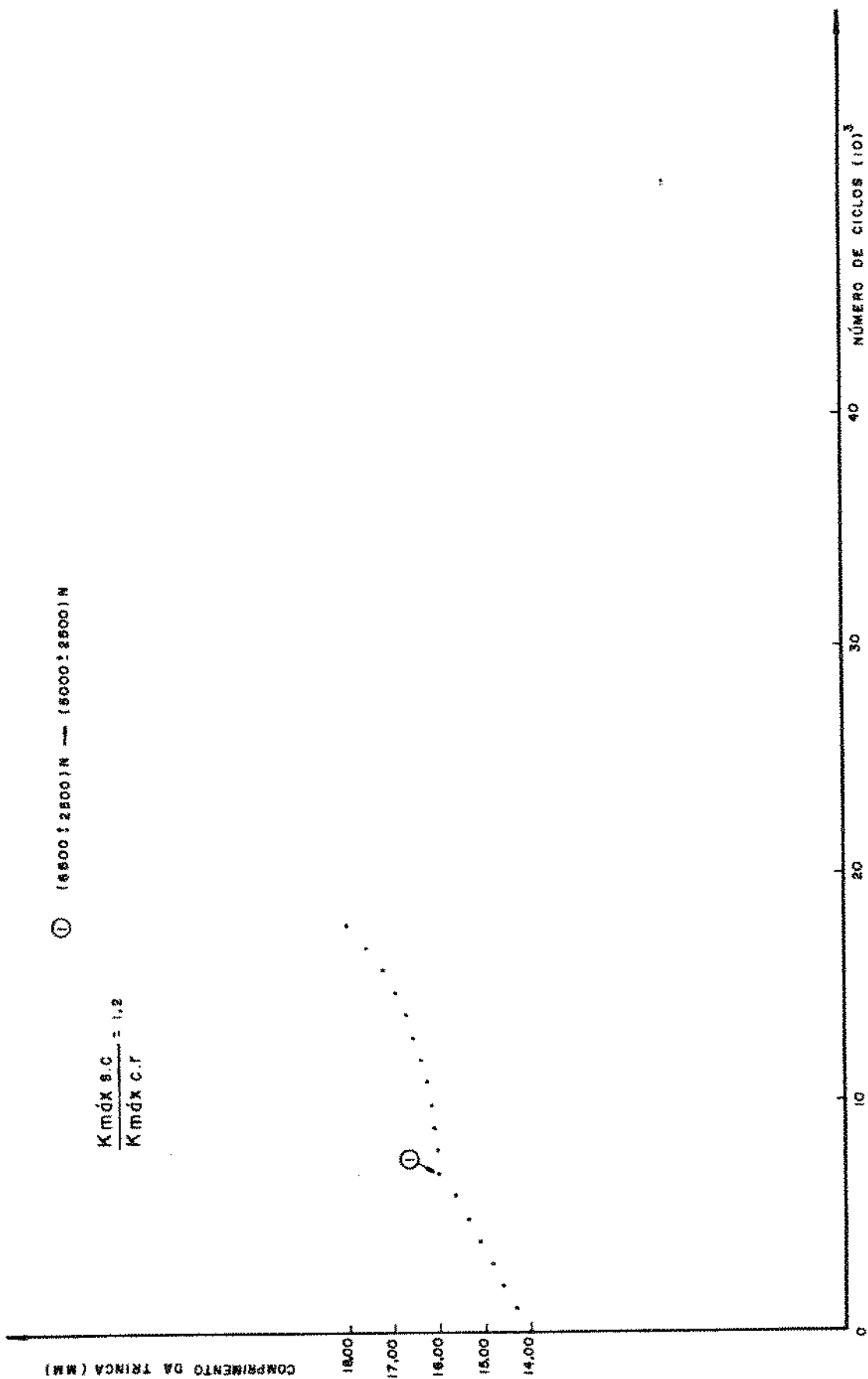


Figura 26 -  $\frac{K_{\text{máx S.C.}}}{K_{\text{máx C.F.}}} = 1,20$

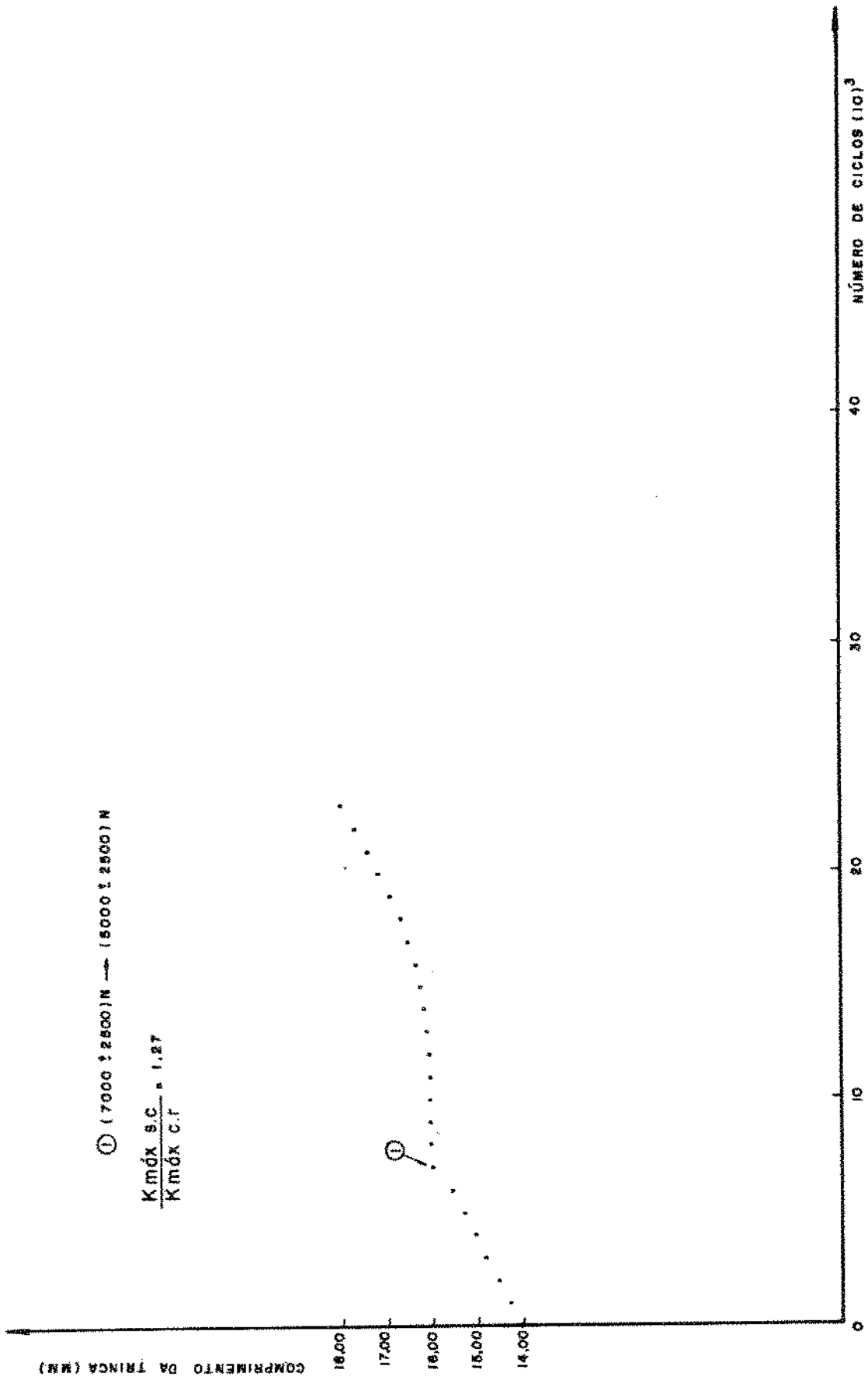


Figura 27 -  $\frac{K_{\text{máx S.C.}}}{K_{\text{máx C.F.}}} = 1,27$

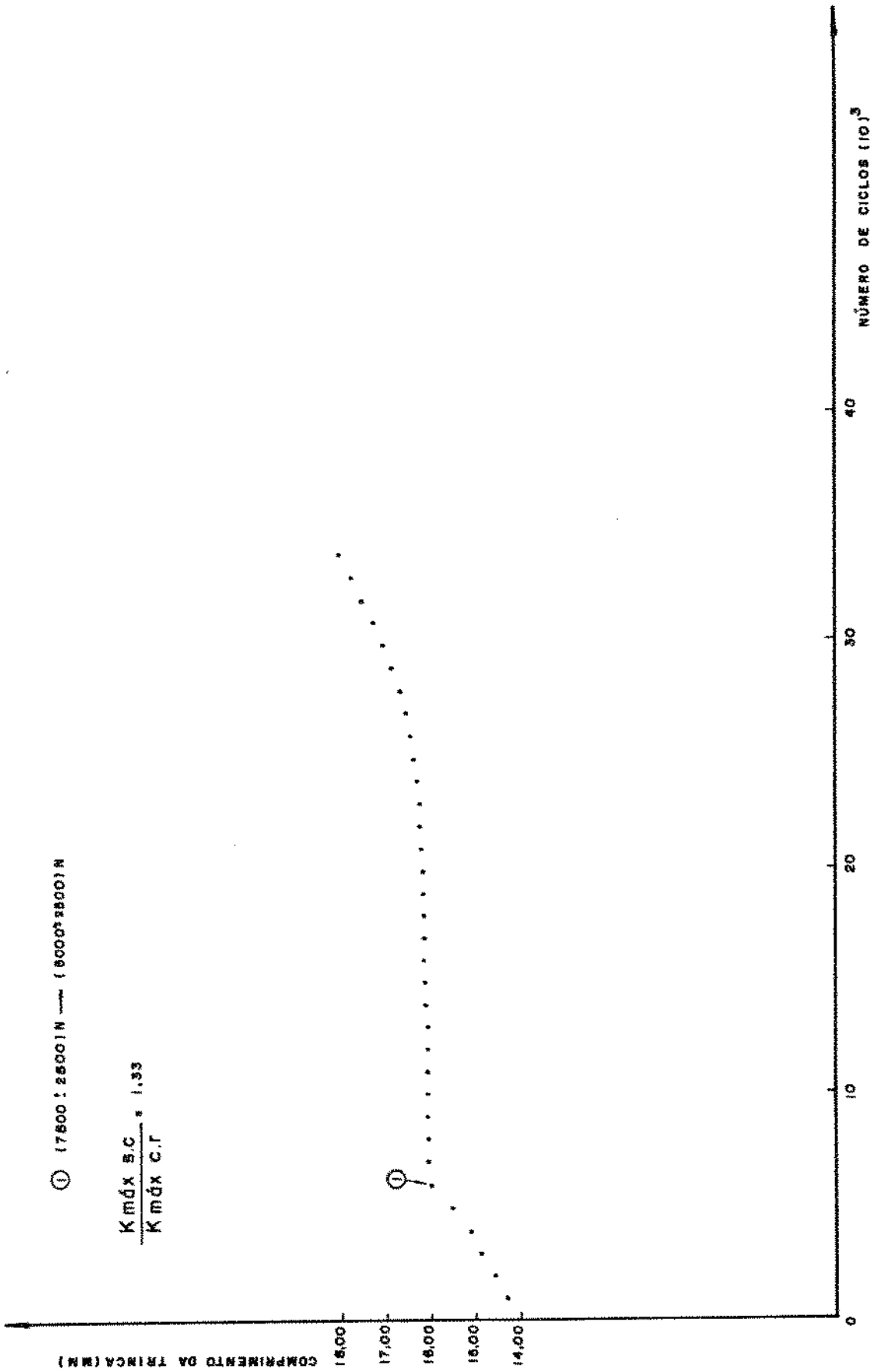


Figura 28 -  $\frac{K \text{ máx S.C.}}{K \text{ máx C.I.}} = 1,33$

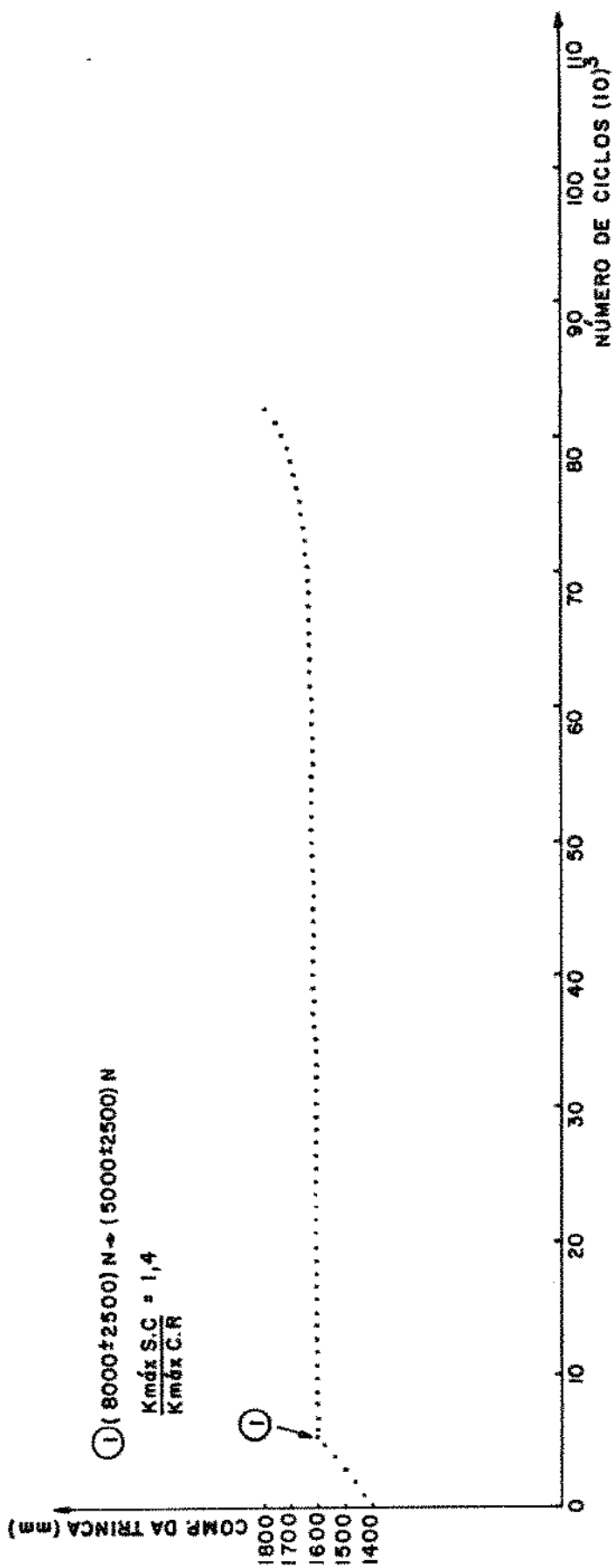


Figura 29 -  $\frac{K_{\text{máx S.C.}}}{K_{\text{máx C.R.}}} = 1,40$

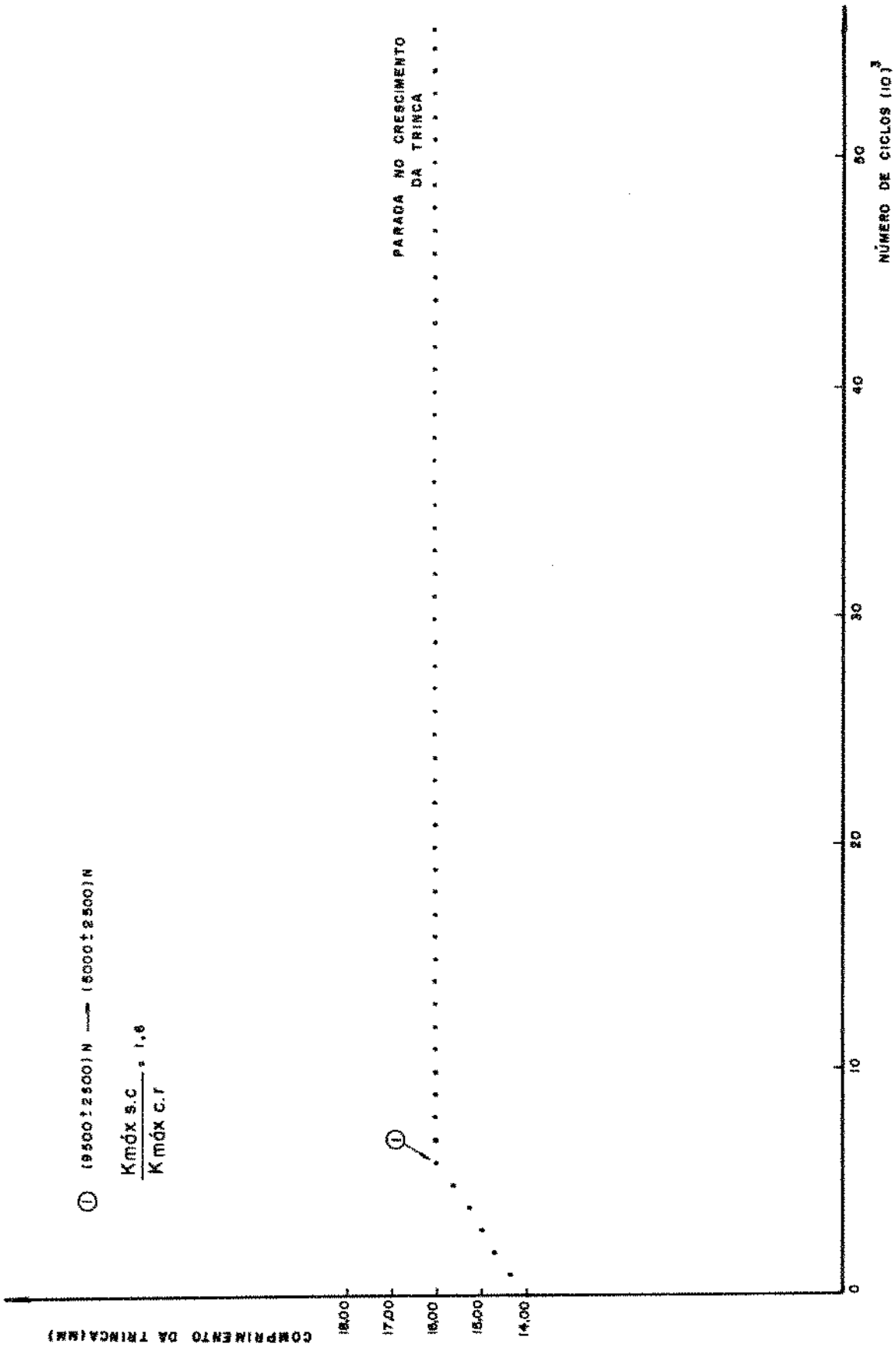


Figura 30 -  $\frac{K_{m\acute{o}x \text{ S.C.}}}{K_{m\acute{o}x \text{ C.R}}} = 1,60$



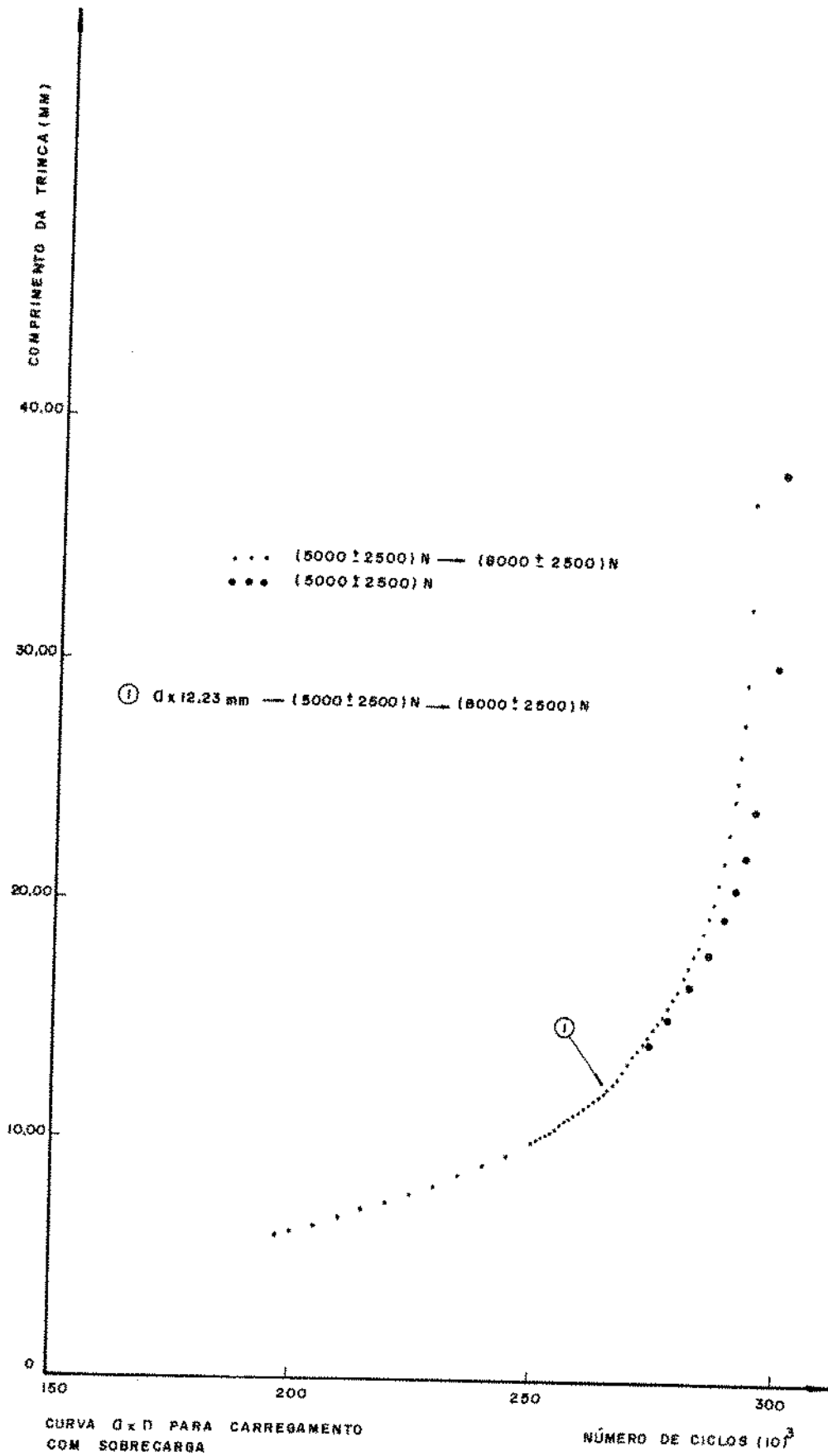


Figura 31 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos para carregamento com sobrecarga.

eficiência do retardo na velocidade de crescimento da trinca, conhecidas como cargas de tração de valor menor.

Assim, obtidos os valores limites inferior e superior da relação  $\frac{K_{m\bar{x}} S_c}{K_{m\bar{x}} C_r}$  que determinam, respectivamente, o início da presença do retardo na propagação da fissura e a parada completa no crescimento da trinca por fadiga em carregamentos de seqüência descendente e observado a alteração na curva  $a \times N$  em carregamentos com sobrecargas, podemos definir a carga de referência e os valores das sobrecargas para o estudo dos efeitos de interação a serem analisados, levando em consideração também que a equação de Forman utilizada na determinação dos modelos teóricos representam bem os dados experimentais em ensaios de propagação de trinca sob carregamentos de amplitude constante, na região II da curva  $\frac{da}{dN} \times \log \Delta K$ , de grande interesse para os problemas de engenharia.

A carga de referência empregada foi de  $(5000 \pm 2500)$  N e as sobrecargas foram de  $(6500 \pm 2500)$  N,  $(7000 \pm 2500)$  N,  $(7500 \pm 2500)$  N e  $(8000 \pm 2500)$  N, cujas relações  $\frac{K_{m\bar{x}} S_c}{K_{m\bar{x}} C_r}$  são, respectivamente, 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40; ou seja, no intervalo dos valores limites de projeto determinados.

Uma vez definidas a carga de referência e as sobrecargas que vão compor os programas de ensaio subsequentes para estudar os efeitos de interação, é necessário, com os resultados empíricos dos carregamentos sob amplitude constante, determinar as constantes C e n da equação de Forman,  $\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^n}{(1-R) K_c - \Delta K}$  que será empregada em todos os modelos teóricos a serem propostos.

O primeiro passo para a obtenção das constantes C e n

da equação de Forman, foi determinar as equações das curvas comprimento da trinca versus número de ciclos ( $a \times N$ ) para os carregamentos de amplitude constante. Assim, os seguintes polinômios de 6º grau para as unidades em metros e ciclos, foram obtidos:

a)  $(5000 \pm 2500)N$

$$a = 0,1456 (10)^{-32} N^6 - 0,2625 (10)^{-27} N^5 - 0,1222 (10)^{-21} N^4 + 0,2374 (10)^{-16} N^3 - 0,1686 (10)^{-11} N^2 + 0,1189 (10)^{-5} N - 0,1644$$

b)  $(6500 \pm 2500)N$

$$a = 0,3299 (10)^{-34} N^6 + 0,2284 (10)^{-27} N^5 + 0,6525 (10)^{-22} N^4 - 0,1068 (10)^{-15} N^3 + 0,2358 (10)^{-10} N^2 - 0,3218 (10)^{-6} N - 0,1992$$

c)  $(7000 \pm 2500)N$

$$a = 0,9238 (10)^{-33} N^6 - 0,3537 (10)^{-27} N^5 - 0,3577 (10)^{-22} N^4 - 0,1495 (10)^{-16} N^3 + 0,7613 (10)^{-11} N^2 + 0,4449 (10)^{-5} N - 0,1132 (10)^1$$

d)  $(7500 \pm 2500)N$

$$a = 0,6774 (10)^{-32} N^6 - 0,3261 (10)^{-27} N^5 - 0,5241 (10)^{-21} N^4 - 0,1331 (10)^{-16} N^3 + 0,9818 (10)^{-11} N^2 + 0,4232 (10)^{-5} N - 0,6094$$

e)  $(8000 \pm 2500)N$

$$a = 0,1147 (10)^{-32} N^6 + 0,3139 (10)^{-26} N^5 - 0,1519 (10)^{-20} N^4 + 0,2963 (10)^{-15} N^3 - 0,3231 (10)^{-10} N^2 + 0,3133 (10)^{-5} N - 0,1968$$

A seguir as funções que associam o comprimento da trinca com o número de ciclos da carga aplicada foram derivadas, apresentando os seguintes resultados:

a) (5000 ± 2500)N

$$\frac{da}{dN} = 8,737 (10)^{-33} N^5 - 1,312 (10)^{-27} N^4 - 4,886 (10)^{-22} N^3 + 7,123 (10)^{-17} N^2 - 3,373 (10)^{-12} N + 0,1189 (10)^{-5}$$

b) (6500 ± 2500)N

$$\frac{da}{dN} = 1,979 (10)^{-34} N^5 + 1,142 (10)^{-27} N^4 + 2,610 (10)^{-22} N^3 - 3,205 (10)^{-16} N^2 + 4,716 (10)^{-11} N - 0,3218 (10)^{-6}$$

c) (7000 ± 2500)N

$$\frac{da}{dN} = 5,543 (10)^{-33} N^5 - 1,769 (10)^{-27} N^4 - 1,431 (10)^{-22} N^3 - 4,486 (10)^{-17} N^2 + 1,523 (10)^{-11} N + 0,4449 (10)^{-5}$$

d) (7500 ± 2500)N

$$\frac{da}{dN} = 4,064 (10)^{-32} N^5 - 1,630 (10)^{-27} N^4 - 2,096 (10)^{-21} N^3 - 3,994 (10)^{-17} N^2 + 1,964 (10)^{-11} N + 0,4232 (10)^{-5}$$

e) (8000 ± 2500)N

$$\frac{da}{dN} = - 6,882 (10)^{-33} N^5 + 1,569 (10)^{-26} N^4 - 6,077 (10)^{-21} N^3 + 8,889 (10)^{-16} N^2 - 6,462 (10)^{-11} N + 0,3133 (10)^{-5}$$

Utilizando o fator de correção de Gross [70] nos cálculos do fator intensidade de tensão para a geometria do corpo de prova empregado no desenvolvimento experimental do trabalho, ou seja,

$$K = \sigma \sqrt{a} | 1,99 - 0,41 (a/w) + 18,70 (a/w)^2 - 38,48 (a/w)^3 + 53,85 (a/w)^4 |$$

construímos as curvas  $\frac{da}{dN}$  versus  $\ln \Delta K$  para os valores de  $R$  a serem empregados, como pode ser observado na figura 32.

Para o cálculo das constantes  $C$  e  $n$  da equação de Forman, utilizamos tabela análoga à representada a seguir para a carga de  $(8000 \pm 2500)N$ , na qual consta também os valores de  $\frac{da}{dN}$  obtidos pelo emprego da equação de Forman, possibilitando uma comparação com os valores de  $\frac{da}{dN}$  obtidos através do polinômio representativo das curvas experimentais.

Para o cálculo dos valores de  $\frac{da}{dN}$  através da equação de Forman,

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^n}{(1-R) K_C - \Delta K}$$

empregamos os valores das constantes  $C$  e  $n$  determinados anteriormente,  $C = 1,873 (10)^{-13}$  e  $n = 1,924$ ,  $R$  representa a razão entre o valor mínimo de  $K$  e o valor máximo de  $K$ , em um dado ciclo e  $K_C = 91,1 \text{ MPa } \sqrt{m}$  [16].

Podemos afirmar que os valores determinados pela equação de Forman se aproximam bem dos resultados empíricos de ensaios de fadiga em carregamentos de amplitude constante, como pode ser verificado na figura 33 que representa as curvas experimentais para as cargas de  $(5000 \pm 2500)N$ ,  $(6500 \pm 2500)N$ ,  $(7000 \pm 2500)N$ ,  $(7500 \pm 2500)N$ ,  $(8000 \pm 2500)N$  e os resultados obtidos pela equação teórica.

Uma vez determinadas as constantes  $C$  e  $n$  a serem usadas na equação de Forman e verificada a sua aplicabilidade a resultados de ensaios de fadiga submetidos a carregamentos de amplitude constante, podemos a seguir apresentar os programas de ensaios que juntamente com a equação de Forman e o modelo de Willenborg resultarão nos modelos teóricos dos fenômenos de interação que serão estudados.

Tabela 3 - Determinação das constantes C e n da equação de Forman.

Compr. Trinca (mm)	Número de ciclos (Curvas Experimentais)	$\frac{da}{dN}$ (Polinômio)	$\Delta K = K_{m\acute{a}x.} - K_{m\acute{i}n.}$ (Pa $\sqrt{m}$ )	$\frac{da}{dN}$ (Equação de Forman)
6,00	173200	8,0909 (10) <sup>-8</sup>	7219070,72	8,125088 (10) <sup>-8</sup>
8,00	194200	1,8555 (10) <sup>-8</sup>	8716238,03	1,2180293 (10) <sup>-7</sup>
10,00	208000	1,56887 (10) <sup>-7</sup>	10243901,79	1,738457 (10) <sup>-7</sup>
12,00	218000	3,85049 (10) <sup>-7</sup>	11848876,57	2,4173154 (10) <sup>-7</sup>
14,00	224000	5,85289 (10) <sup>-7</sup>	13565099,57	3,3162868 (10) <sup>-7</sup>
16,00	228500	7,70898 (10) <sup>-7</sup>	15421572,46	4,5261924 (10) <sup>-7</sup>
18,00	231700	9,22906 (10) <sup>-7</sup>	17446490,34	6,1865627 (10) <sup>-7</sup>
20,00	233930	1,039247 (10) <sup>-6</sup>	19669923,66	8,5227456 (10) <sup>-7</sup>
22,00	235200	1,109456 (10) <sup>-6</sup>	22125921,17	1,1921913 (10) <sup>-6</sup>
24,00	236240	1,16916 (10) <sup>-6</sup>	24854421,21	1,7105222 (10) <sup>-6</sup>

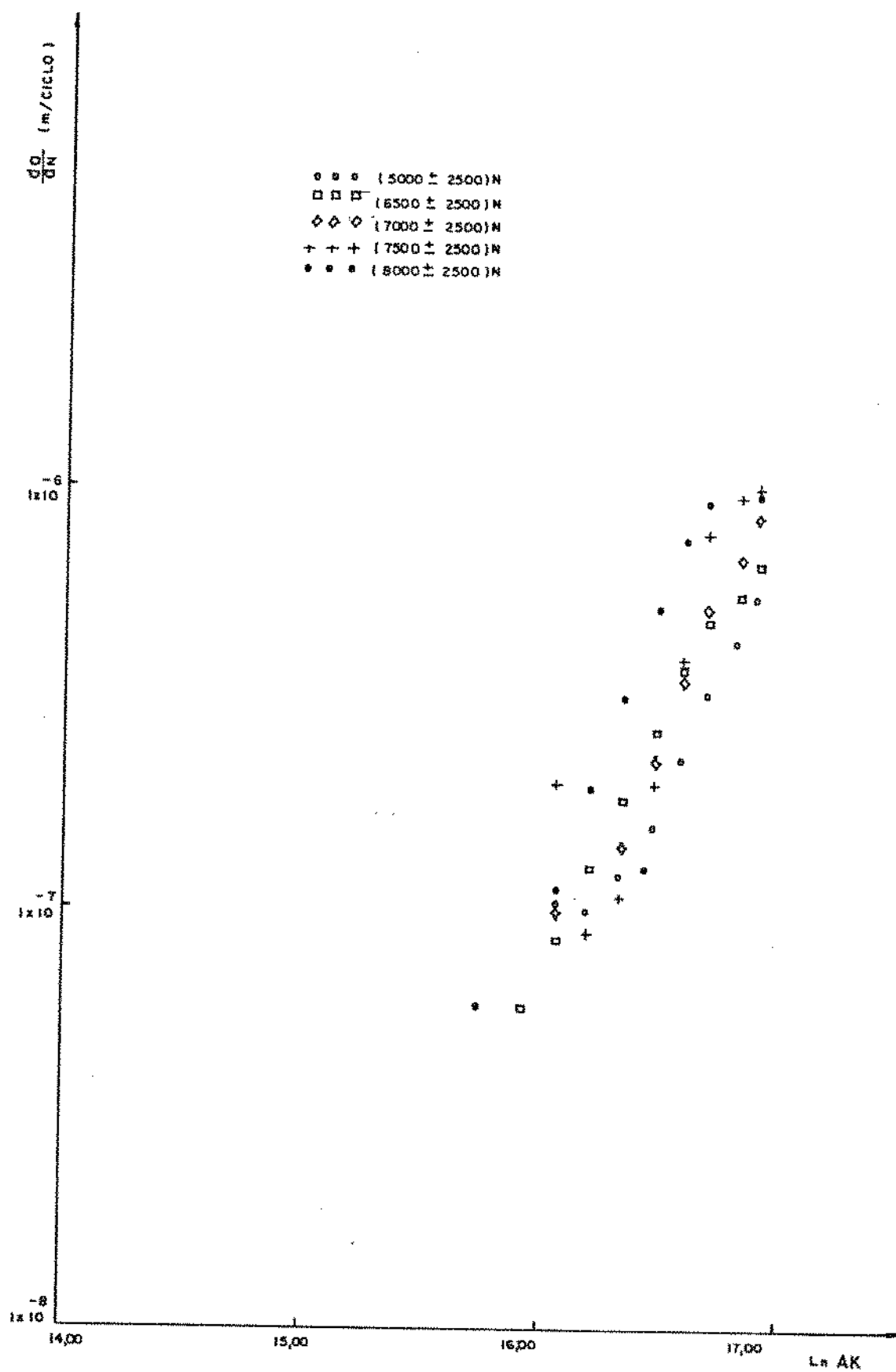


Figura 32 - Curvas  $\frac{da}{dN} \times \ln \Delta K$ .

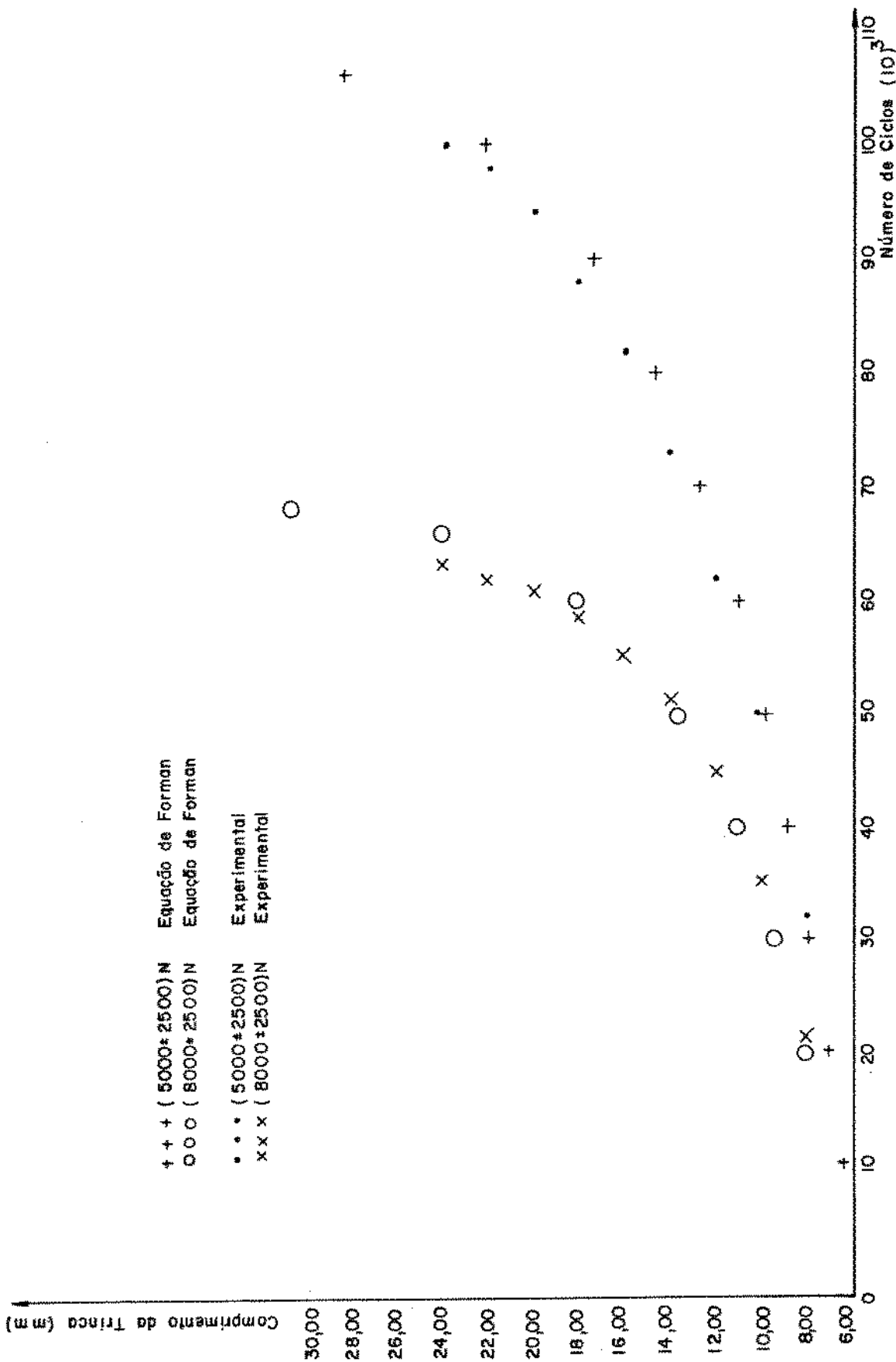


Figura 33 - Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos experimentais e valores teóricos obtidos pela equação de Forman.



### 4.3 PROGRAMA INTERMEDIÁRIO DE ENSAIOS

No programa intermediário de ensaios, foram realizados alguns experimentos com o objetivo de se analisar a presença da aceleração e do retardo na propagação da trinca por fadiga em carregamentos de sequência ascendente e descendente, respectivamente; ou seja, o estudo do efeito de eventuais sobrecargas para as condições normais das cargas de referência escolhidas no primeiro programa de ensaios. Os resultados podem ser observados nas figuras 34, 35, 36 e 37.

No ensaio cujo resultado está apresentado na figura 34, a carga de referência foi de  $(5000 \pm 2500)$ N e para um comprimento da trinca de 12,32 mm a amostra foi submetida a uma sobrecarga de  $(6500 \pm 2500)$ N que se manteve até um comprimento da trinca de 30,16 mm, retornando em seguida à carga de referência até a ruptura do corpo de prova. Na figura 34 está indicado também os resultados do ensaio de um espécime submetido a um carregamento de amplitude constante no valor da carga de referência. Podemos observar a alteração no comportamento da curva comprimento da trinca versus número de ciclos em função da aplicação da sobrecarga no ponto 1 comparado com os resultados do ensaio no carregamento de amplitude constante e no ponto 2 surge um início de retardo na propagação da trinca ocorrendo a ruptura da amostra em seguida.

Nos ensaios representados pelas figuras 35 e 36, o objetivo foi verificar a influência dos valores da sobrecarga na aceleração e no retardo do crescimento da trinca por fadiga. Assim, em ambos os ensaios ocorre a aplicação da sobrecarga para o comprimento da trinca de 6,21 mm, representado pelo ponto 1,

o retorno à carga de referência para o comprimento da trinca de 9,42 mm, indicado pelo ponto 2 e no ponto 3 ocorre uma nova aplicação da sobrecarga para o comprimento da trinca de 13,19mm; nos dois ensaios a carga de referência é de  $(6000 \pm 3500)N$  e as sobrecargas assumem, respectivamente, os valores de  $(7500 \pm 3500)N$  e  $(9000 \pm 3500)N$ .

Analisando as figuras 35 e 36 podemos verificar um maior afastamento da curva representativa dos resultados dos ensaios na carga de referência para o maior valor da sobrecarga; analogamente, um retardo mais sensível no crescimento da trinca para maiores relações de  $\frac{K_{\text{máx}} S.C}{K_{\text{máx}} C.R}$ . Assim, através dos resultados apresentados nas figuras 35 e 36 fica claro a importância do valor da sobrecarga nos efeitos da interação em carregamentos de amplitude não constante.

No último ensaio realizado no programa intermediário, com os resultados apresentados na figura 37, o objetivo foi também observar a aceleração na propagação da trinca por fadiga devido à aplicação de sobrecargas, o que se deu para os pontos 1 e 2 e o retardo no crescimento da fissura no carregamento de sequência descendente que ocorreu nos pontos 3 e 4.

Fazendo ainda uma observação com relação aos resultados apresentados na figura 37, podemos verificar que a vida total do componente submetido às seqüências ascendentes e descendentes de carregamento é menor do que a vida da amostra ensaiada no carregamento de amplitude constante na carga de  $(6000 \pm 3500)N$ .

Apresentados os ensaios preliminares que tiveram a finalidade de determinar os níveis de carga a serem usados nos



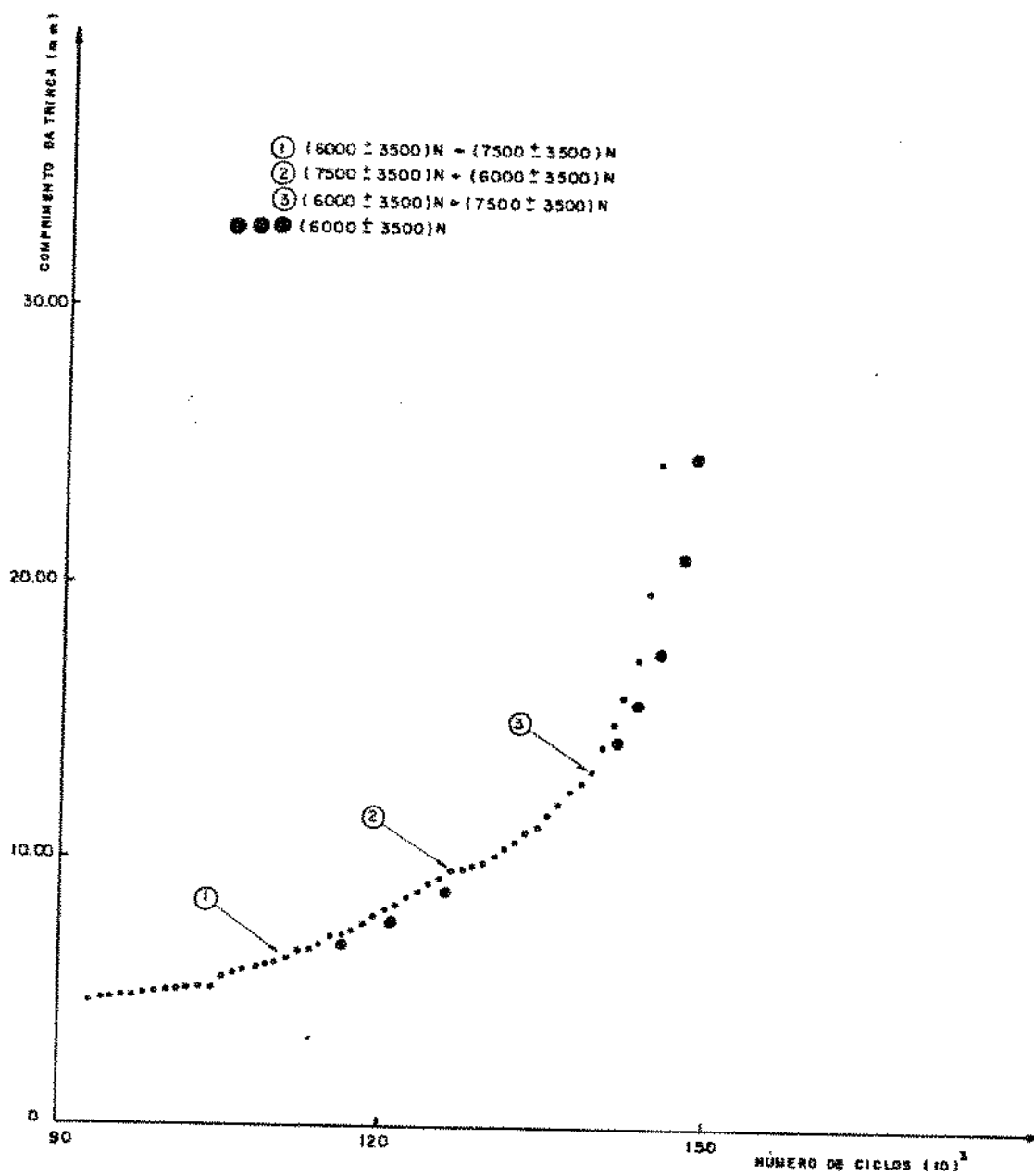


Figura 35 - Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca.

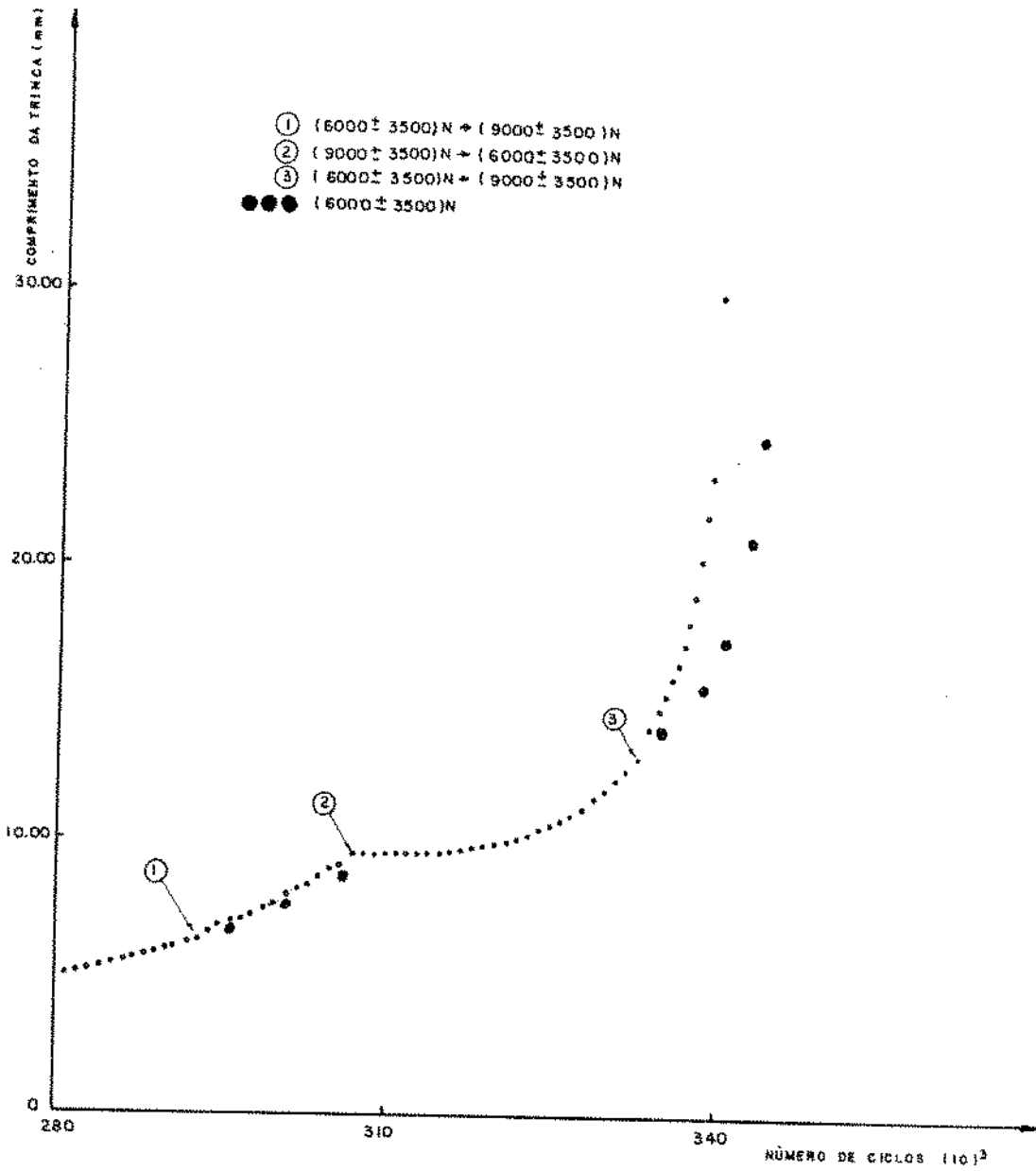


Figura 36 - Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca.

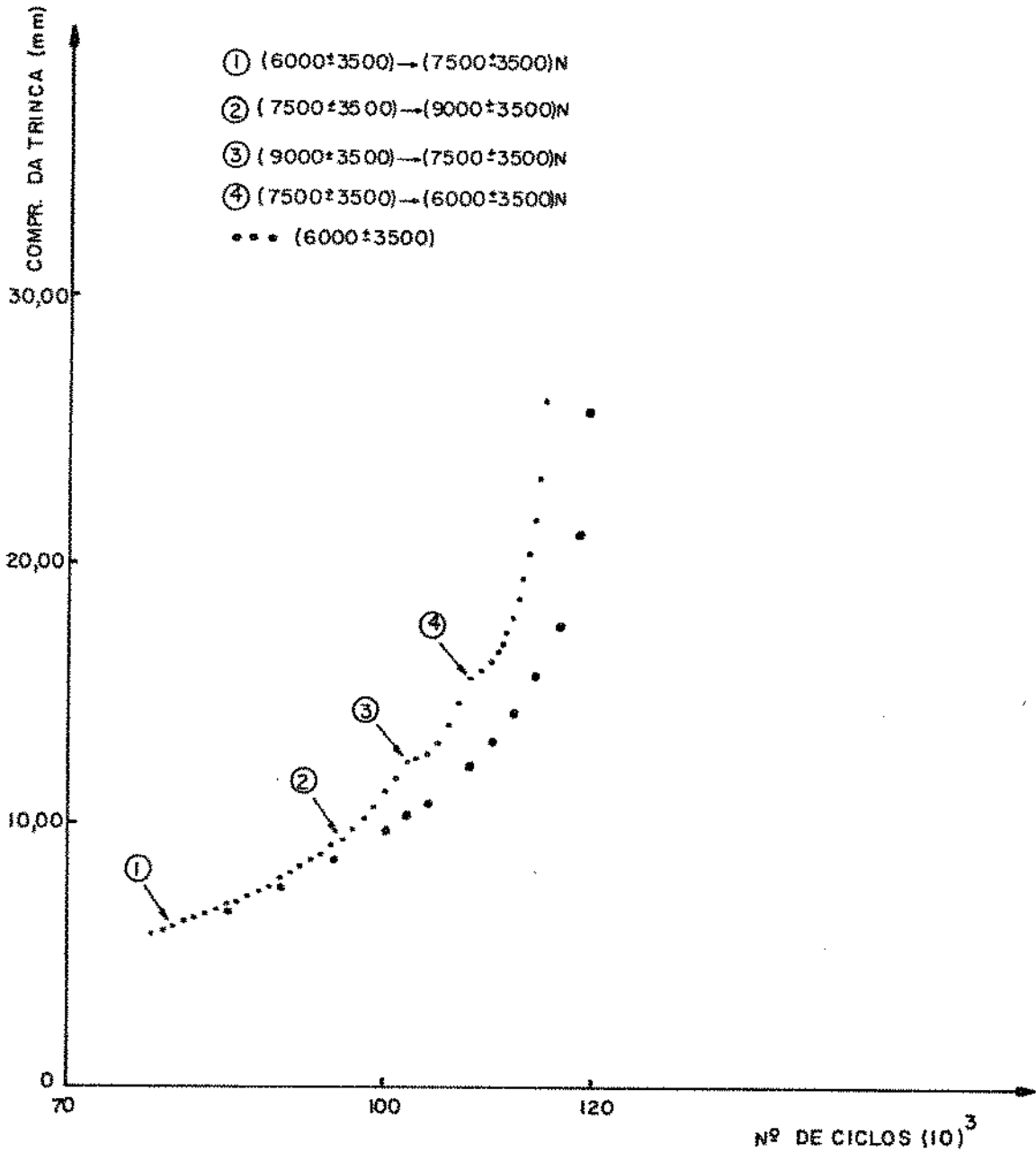


Figura 37 - Observação da aceleração e do retardo no crescimento da trinca.

programas subsequentes, os valores das constantes  $C$  e  $n$  da equação de Forman que será utilizada na elaboração dos modelos teóricos e mostrar a efetiva existência dos efeitos de interação nos carregamentos de amplitude não constante, vamos a seguir iniciar o estudo individual de cada um dos efeitos a serem analisados.

#### 4.4 ACELERAÇÃO NA TAXA DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

Na figura 38 está representado o segundo programa de ensaios desenvolvido com a finalidade de quantificar a aceleração e o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga.

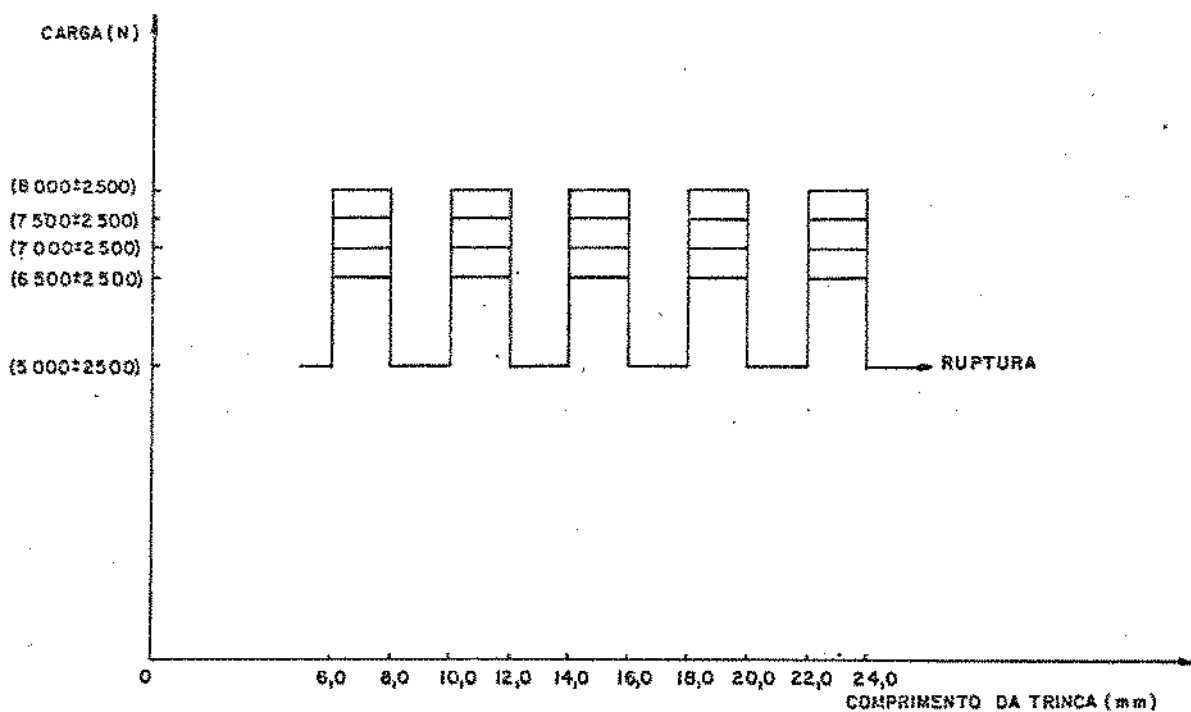


Figura 38 - Segundo Programa de Ensaios.

A carga de  $(5000 \pm 2500)$ N foi usada como referência e as sobrecargas foram de  $(6500 \pm 2500)$ N,  $(7000 \pm 2500)$ N,  $(7500 \pm 2500)$ N e  $(8000 \pm 2500)$ N. Como pode ser observado na figura 38, a amplitude do carregamento cíclico foi aumentada para os comprimentos da trinca de 6,00 mm, 10,00 mm, 14,00 mm, 18,00 mm e 22,00 mm e o retorno à carga de referência ocorreu para os comprimentos da trinca de 8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm. A partir do comprimento da fissura de 24,00 mm, a amostra foi levada à ruptura na carga de referência. Foram ensaiados dois corpos de prova para cada valor de sobrecarga e durante o desenvolvimento do ensaio de fadiga, os comprimentos da trinca foram lidos de 1000 em 1000 ciclos; nos pontos de aplicação da sobrecarga e do retorno à carga de referência a leitura ocorreu de 100 em 100 ciclos até 1000 ciclos.

Os resultados do segundo programa de ensaios estão representados nas figuras 39 a 46.

Na tabela 4 estão indicados os valores dos comprimentos da trinca para as duas amostras utilizadas em cada um dos níveis de sobrecarga nos pontos onde ocorreu a sequência ascendente de carregamento. Estão representados também na mesma tabela, para efeito de comparação, os comprimentos da trinca dos carregamentos de amplitude constante.

O número de ciclos envolvidos em cada um dos blocos do segundo programa de ensaios para os vários níveis de sobrecarga, juntamente com os resultados obtidos nos carregamentos de amplitude constante, estão indicados na tabela 5.



Tabela 4 - Medidas do comprimento da trinca após a aplicação das sobrecargas.

Ciclo	1500 ± 2500N (10)		6500 ± 2500N (20)		15000 ± 2500N (30)		17000 ± 2500N (35)		7000 ± 2500N (40)		15000 ± 2500N (45)		17500 ± 2500N (50)		15000 ± 2500N (55)		18500 ± 2500N (60)		18000 ± 2500N (65)		
	(10)	(20)	(30)	(35)	(40)	(45)	(50)	(55)	(60)	(65)	(70)	(75)	(80)	(85)	(90)	(95)	(100)	(105)	(110)	(115)	
100	6,01	6,01	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,00
200	6,01	6,01	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,01
300	6,01	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,02	6,01	6,02	6,02	6,01
400	6,02	6,02	6,03	6,03	6,02	6,03	6,03	6,03	6,02	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,02	6,03	6,03	6,02
500	6,02	6,02	6,03	6,03	6,02	6,03	6,03	6,03	6,02	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,03	6,02	6,03	6,03	6,02
600	6,03	6,03	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,03
700	6,03	6,04	6,05	6,05	6,03	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,03
800	6,04	6,04	6,05	6,05	6,03	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,04	6,03	6,04	6,04	6,03
900	6,05	6,05	6,06	6,06	6,04	6,05	6,05	6,05	6,04	6,05	6,05	6,05	6,05	6,04	6,05	6,05	6,05	6,04	6,05	6,05	6,04
1000	6,06	6,05	6,07	6,07	6,04	6,06	6,06	6,06	6,05	6,06	6,06	6,06	6,06	6,05	6,06	6,06	6,06	6,05	6,06	6,06	6,05
100	10,06	10,04	10,04	10,04	10,01	10,04	10,04	10,04	10,01	10,04	10,04	10,04	10,04	10,02	10,04	10,04	10,04	10,01	10,02	10,02	10,01
200	10,08	10,04	10,04	10,04	10,01	10,04	10,04	10,04	10,01	10,04	10,04	10,04	10,04	10,02	10,04	10,04	10,04	10,01	10,02	10,02	10,01
300	10,09	10,04	10,05	10,05	10,03	10,05	10,05	10,05	10,03	10,05	10,05	10,05	10,03	10,05	10,05	10,05	10,05	10,03	10,02	10,02	10,01
400	10,11	10,04	10,05	10,06	10,03	10,05	10,06	10,06	10,03	10,05	10,06	10,06	10,04	10,05	10,05	10,05	10,05	10,03	10,02	10,02	10,01
500	10,11	10,07	10,06	10,06	10,05	10,06	10,06	10,06	10,05	10,06	10,06	10,06	10,04	10,05	10,05	10,05	10,05	10,03	10,02	10,02	10,01
600	10,11	10,07	10,06	10,06	10,05	10,06	10,06	10,06	10,05	10,06	10,06	10,06	10,04	10,05	10,05	10,05	10,05	10,03	10,02	10,02	10,01
700	10,11	10,11	10,12	10,12	10,07	10,12	10,12	10,12	10,07	10,12	10,12	10,12	10,10	10,11	10,11	10,11	10,11	10,09	10,08	10,08	10,08
800	10,14	10,11	10,15	10,15	10,08	10,15	10,15	10,15	10,08	10,15	10,15	10,15	10,12	10,11	10,11	10,11	10,11	10,09	10,09	10,09	10,09
900	10,16	10,11	10,15	10,15	10,09	10,16	10,16	10,16	10,09	10,16	10,16	10,16	10,12	10,11	10,11	10,11	10,11	10,09	10,09	10,09	10,09
1000	10,18	10,16	10,17	10,17	10,11	10,17	10,17	10,17	10,11	10,17	10,17	10,17	10,16	10,13	10,13	10,13	10,13	10,11	10,11	10,11	10,11
100	14,05	14,03	14,04	14,04	14,01	14,03	14,03	14,03	14,01	14,03	14,03	14,03	14,03	14,01	14,03	14,03	14,03	14,01	14,02	14,02	14,02
200	14,06	14,03	14,04	14,04	14,01	14,03	14,03	14,03	14,01	14,03	14,03	14,03	14,03	14,01	14,03	14,03	14,03	14,01	14,02	14,02	14,02
300	14,08	14,05	14,06	14,06	14,01	14,08	14,08	14,08	14,01	14,08	14,08	14,08	14,08	14,01	14,08	14,08	14,08	14,01	14,02	14,02	14,02
400	14,12	14,10	14,11	14,10	14,08	14,11	14,10	14,10	14,08	14,11	14,10	14,10	14,10	14,08	14,11	14,10	14,10	14,08	14,02	14,02	14,02
500	14,15	14,15	14,15	14,15	14,11	14,15	14,15	14,15	14,11	14,15	14,15	14,15	14,15	14,11	14,15	14,15	14,15	14,11	14,02	14,02	14,02
600	14,21	14,13	14,13	14,13	14,11	14,14	14,14	14,14	14,11	14,14	14,14	14,14	14,14	14,11	14,14	14,14	14,14	14,11	14,02	14,02	14,02
700	14,25	14,17	14,17	14,17	14,15	14,20	14,20	14,20	14,15	14,20	14,20	14,20	14,20	14,15	14,20	14,20	14,20	14,15	14,02	14,02	14,02
800	14,27	14,20	14,20	14,20	14,19	14,26	14,26	14,26	14,19	14,26	14,26	14,26	14,26	14,19	14,26	14,26	14,26	14,19	14,02	14,02	14,02
900	14,27	14,20	14,20	14,20	14,19	14,26	14,26	14,26	14,19	14,26	14,26	14,26	14,26	14,19	14,26	14,26	14,26	14,19	14,02	14,02	14,02
1000	14,31	14,26	14,26	14,26	14,22	14,32	14,32	14,32	14,22	14,32	14,32	14,32	14,32	14,22	14,32	14,32	14,32	14,22	14,02	14,02	14,02
100	18,05	18,08	18,11	18,06	18,07	18,11	18,06	18,06	18,07	18,07	18,06	18,06	18,06	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
200	18,07	18,14	18,17	18,13	18,12	18,17	18,13	18,13	18,12	18,12	18,17	18,17	18,17	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
300	18,16	18,18	18,21	18,19	18,16	18,19	18,19	18,19	18,16	18,16	18,17	18,17	18,17	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
400	18,21	18,25	18,25	18,21	18,24	18,27	18,27	18,27	18,24	18,24	18,22	18,22	18,22	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
500	18,28	18,30	18,31	18,26	18,32	18,32	18,32	18,32	18,32	18,32	18,29	18,29	18,29	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
600	18,33	18,33	18,33	18,33	18,34	18,38	18,38	18,38	18,34	18,34	18,35	18,35	18,35	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
700	18,39	18,36	18,36	18,36	18,37	18,38	18,38	18,38	18,37	18,37	18,36	18,36	18,36	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
800	18,44	18,41	18,41	18,41	18,42	18,43	18,43	18,43	18,42	18,42	18,46	18,46	18,46	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
900	18,50	18,43	18,43	18,43	18,49	18,48	18,48	18,48	18,42	18,42	18,51	18,51	18,51	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
1000	18,56	18,49	18,49	18,49	18,53	18,53	18,53	18,53	18,49	18,49	18,58	18,58	18,58	18,04	18,06	18,06	18,06	18,04	18,04	18,04	18,04
100	22,11	22,13	22,13	22,14	22,15	22,14	22,14	22,14	22,15	22,15	22,14	22,14	22,14	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
200	22,25	22,22	22,21	22,27	22,23	22,27	22,27	22,27	22,23	22,23	22,25	22,25	22,25	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
300	22,40	22,32	22,28	22,40	22,28	22,40	22,40	22,40	22,28	22,28	22,37	22,37	22,37	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
400	22,46	22,40	22,38	22,54	22,41	22,54	22,54	22,54	22,41	22,41	22,50	22,50	22,50	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
500	22,55	22,50	22,45	22,69	22,50	22,69	22,69	22,69	22,50	22,50	22,61	22,61	22,61	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
600	22,68	22,63	22,63	22,78	22,60	22,78	22,78	22,78	22,60	22,60	22,76	22,76	22,76	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
700	22,76	22,69	22,61	22,93	22,72	22,93	22,93	22,93	22,72	22,72	22,94	22,94	22,94	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
800	22,86	22,84	22,78	23,05	22,86	23,05	23,05	23,05	22,86	22,86	23,07	23,07	23,07	22,09	22,11	22,11	22,11	22,09	22,09	22,09	22,09
900	23,00	23,04	23,04	23,17	23,00	23,17	23,17	23,17	23,00	23,00	23,18	23,18	23,18	22,09	22,						



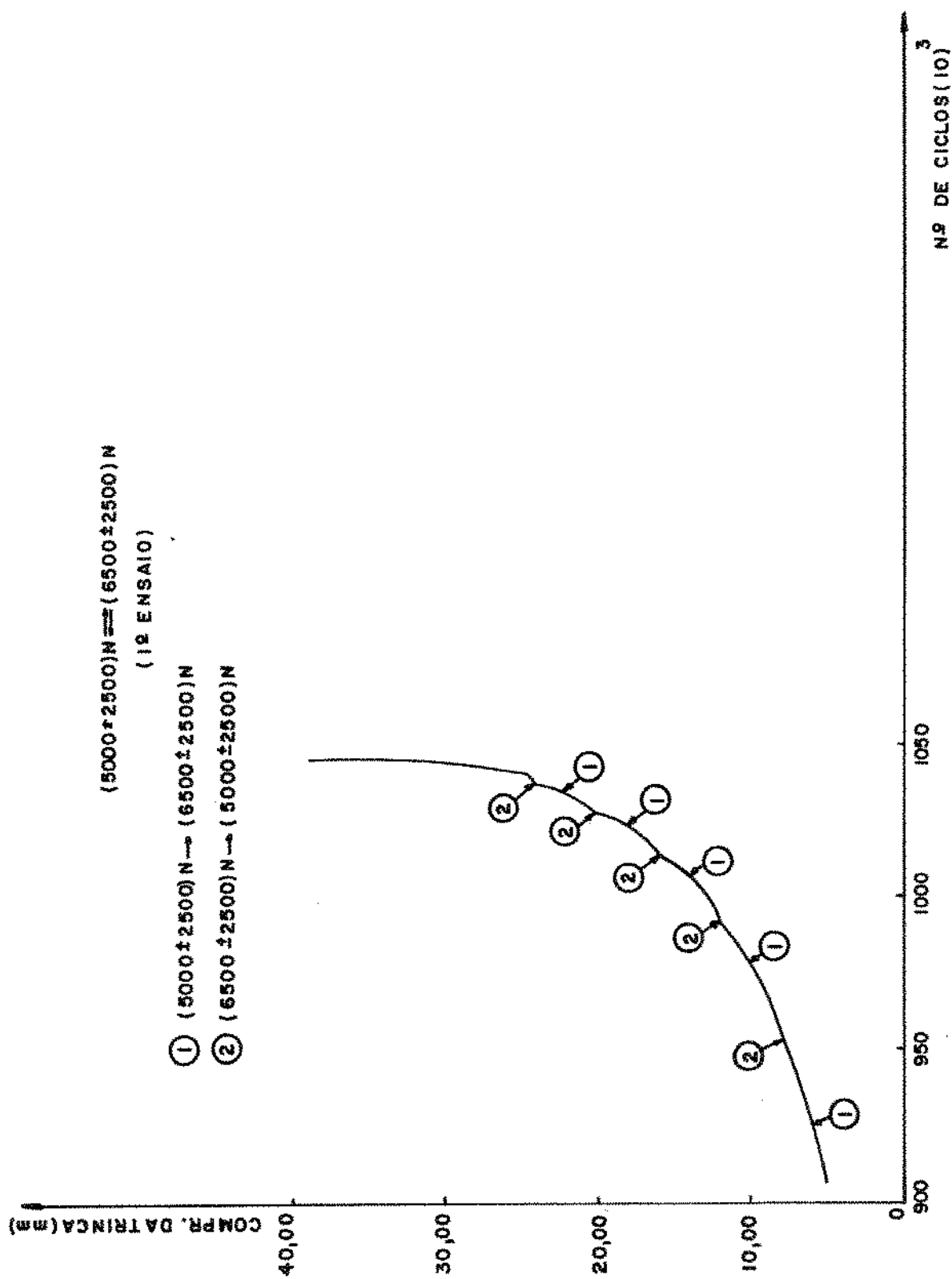


Figura 39 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 $(5000 \pm 250)N \rightarrow (6500 \pm 250)N$ . 1ª Ensaio

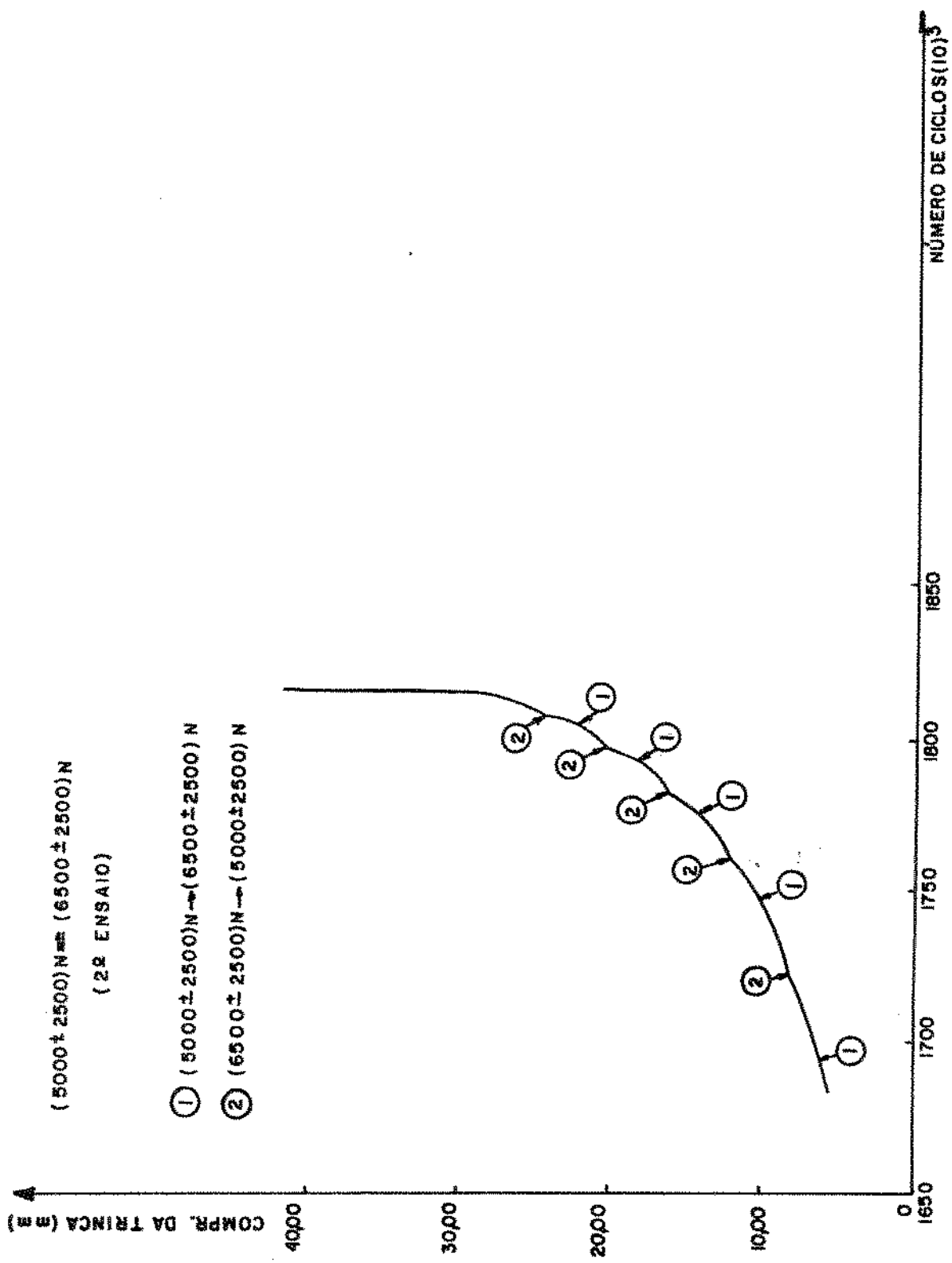


Figura 40 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000 ± 2500) N + (6500 ± 2500) N. 2ª Ensaio

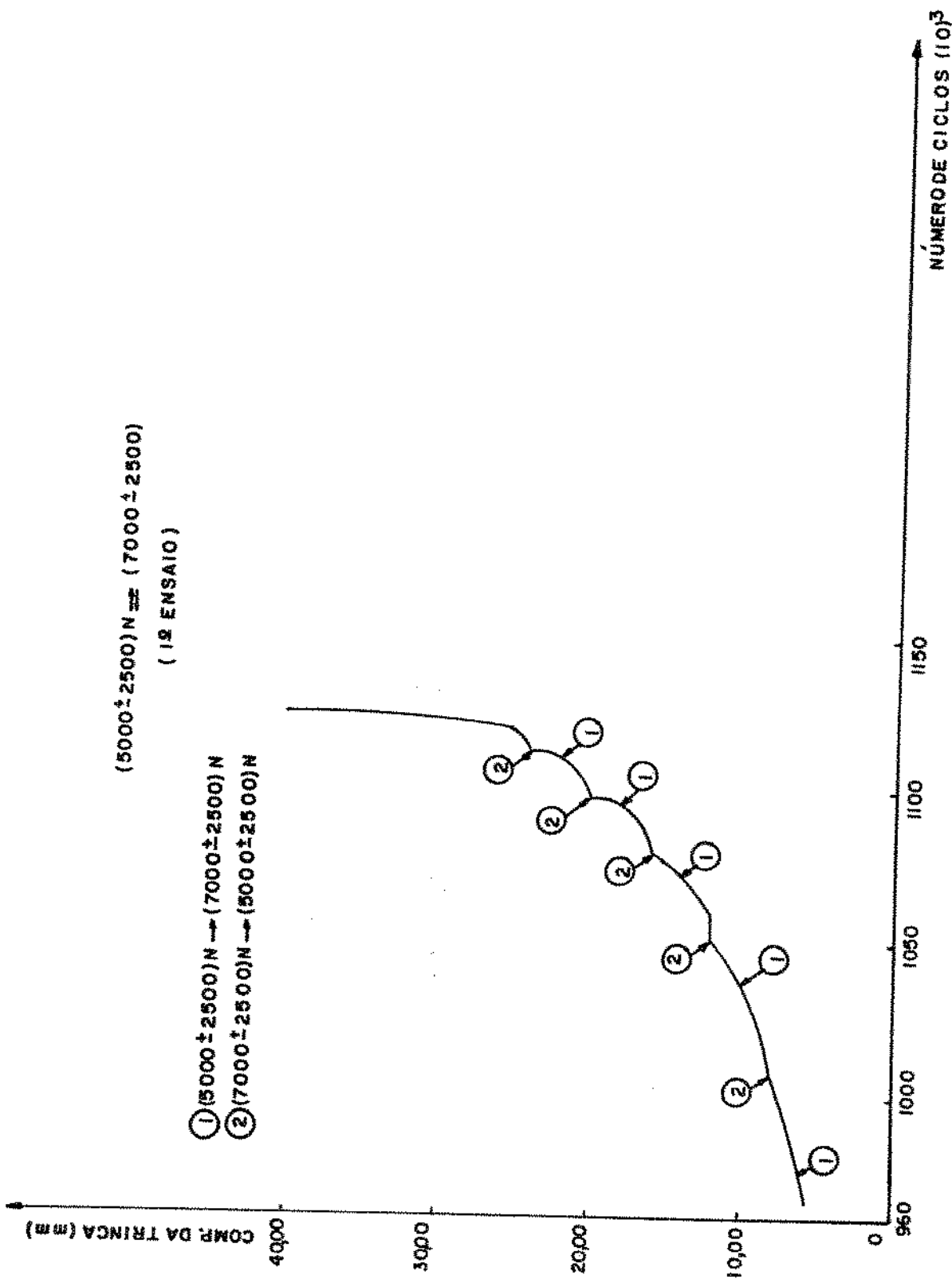


Figura 41 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N + (7000±2500)N. 1ª Ensaio

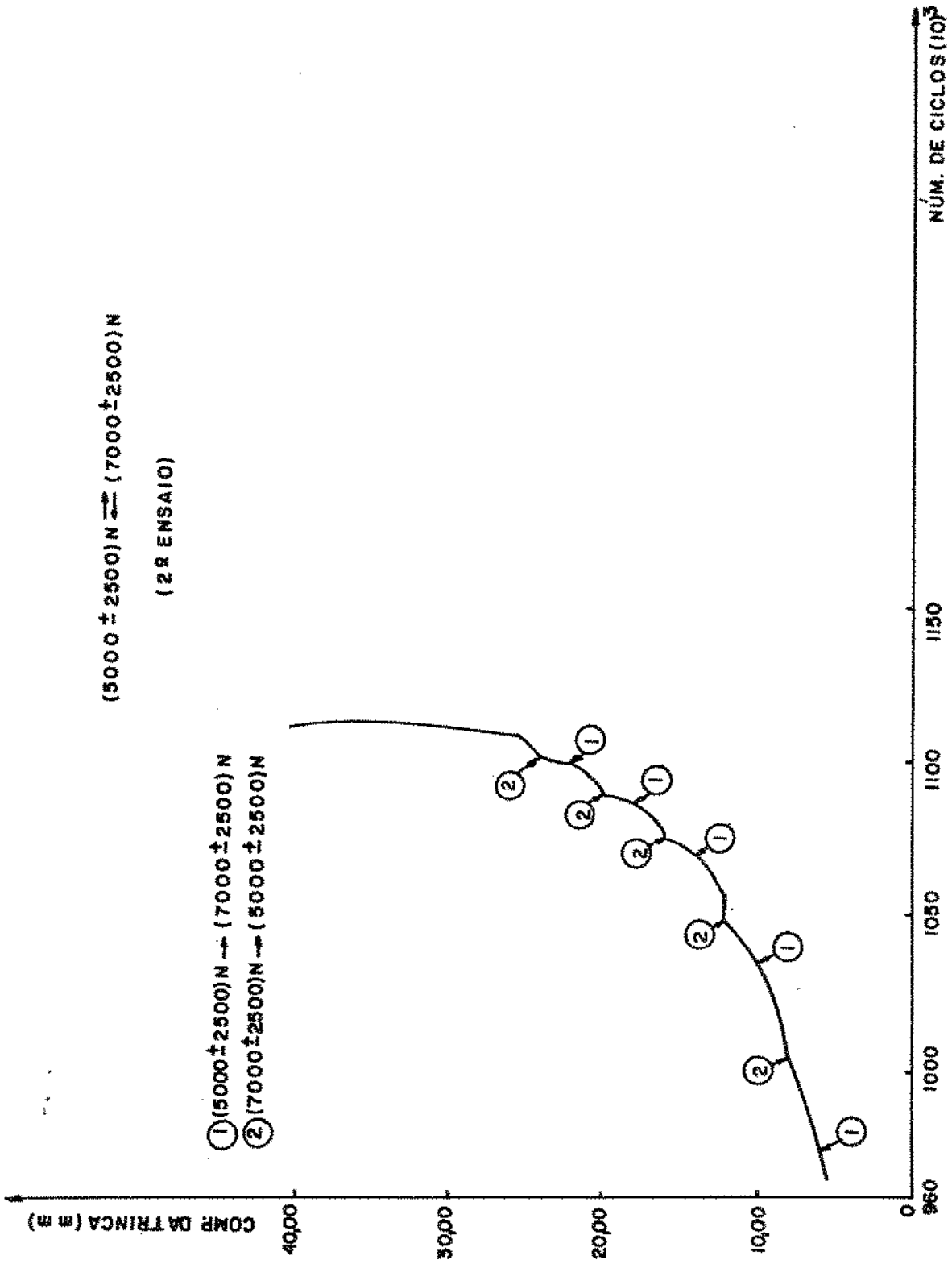


Figura 42 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 (5000±250)N + (7000±250)N. 2º Ensaio

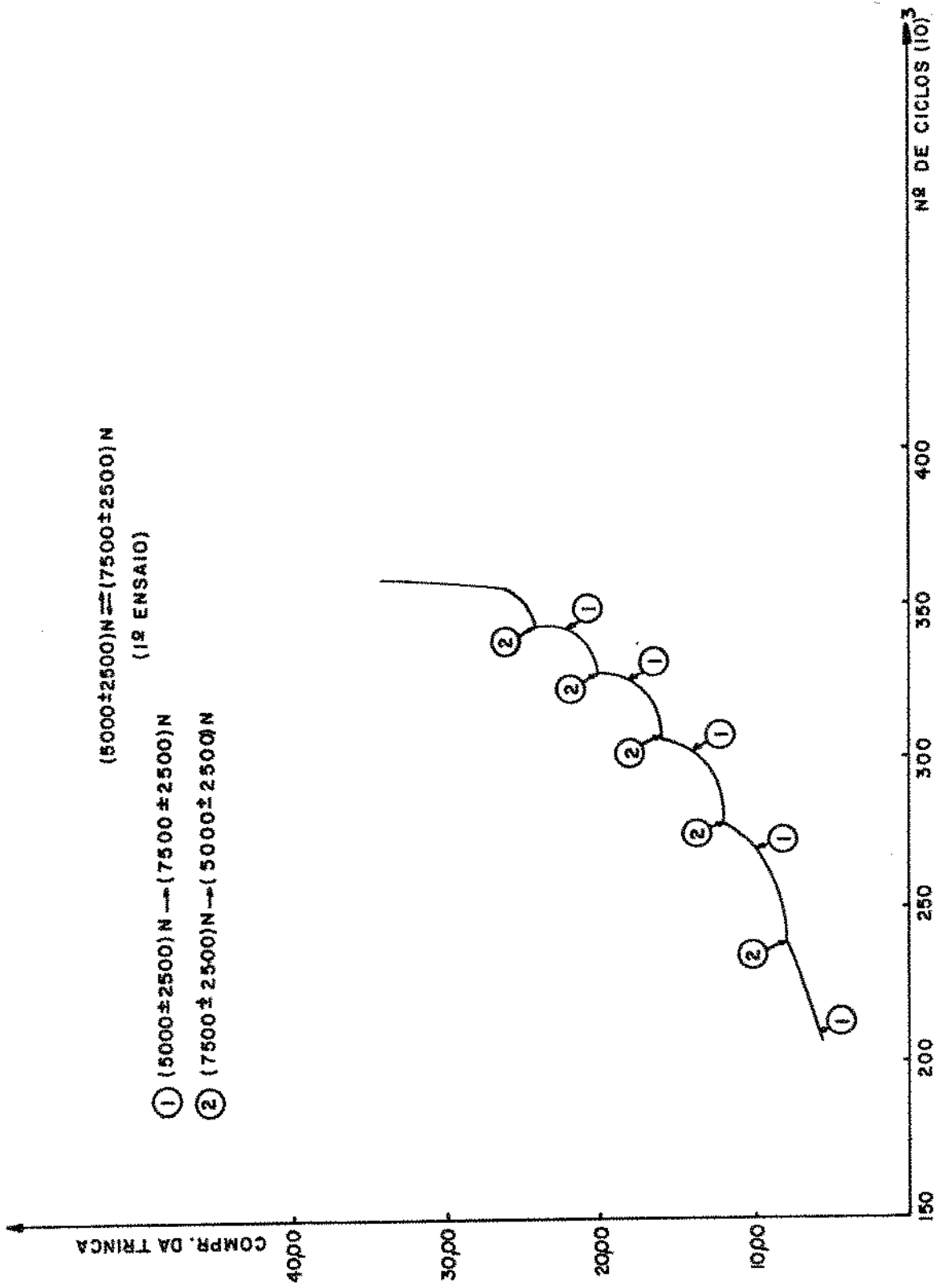


Figura 43 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7500 \pm 2500)N$ . 1ª Ensaio

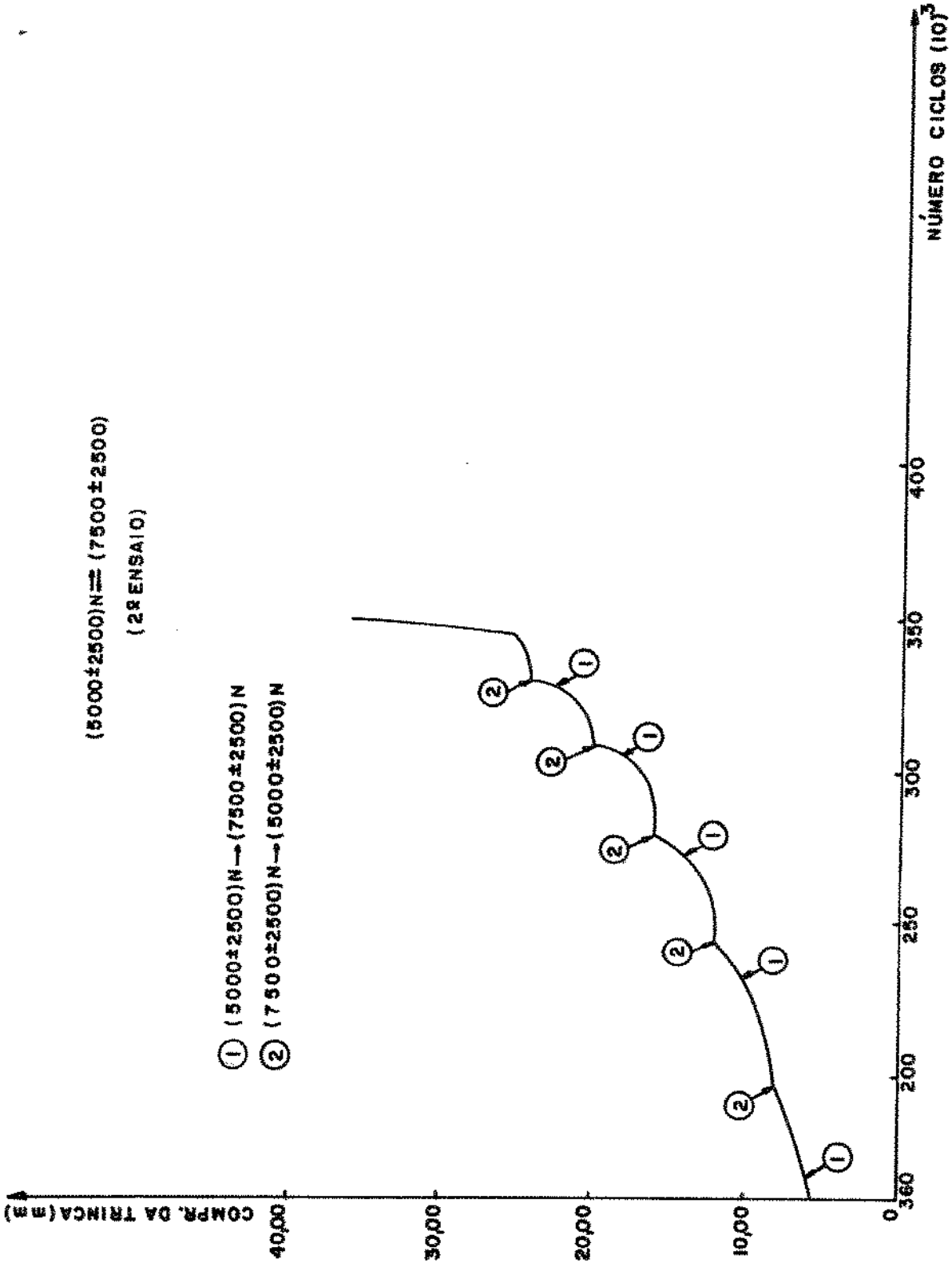


Figura 44 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N → (7500±2500)N 2ª Ensaio



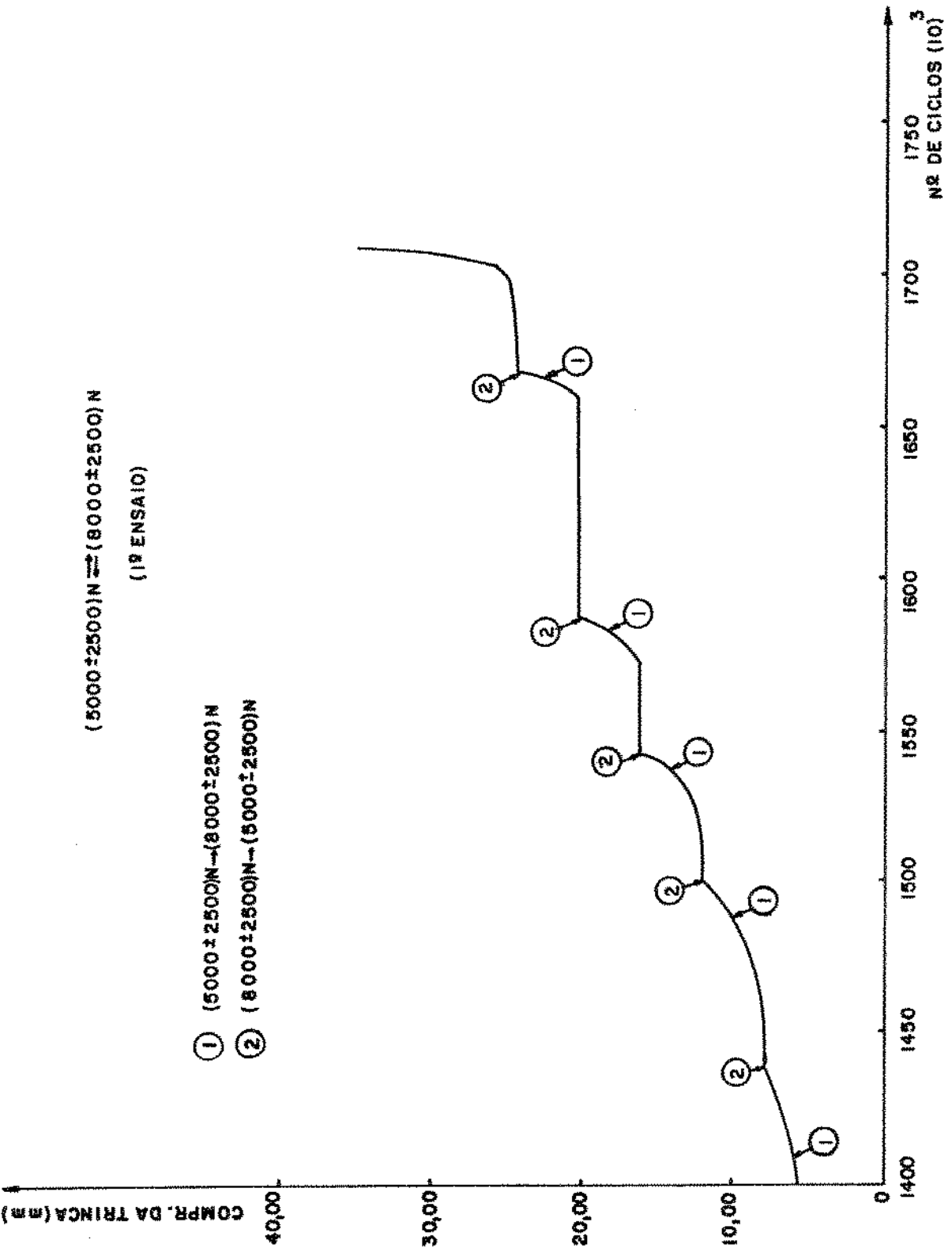


Figura 45 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000 ± 2500)N ↔ (8000 ± 2500)N. 1º Ensaio

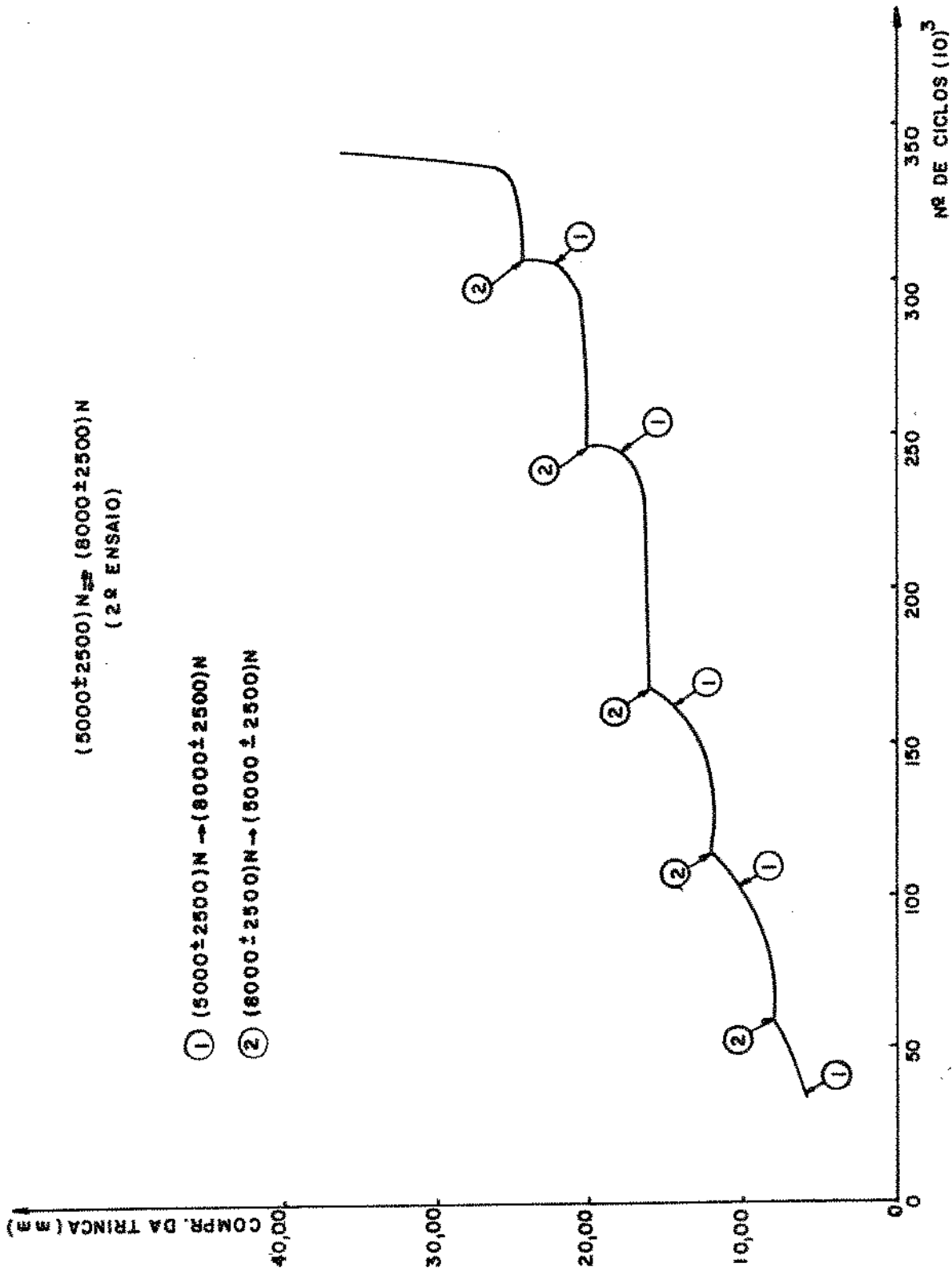


Figura 46 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N → (8000±2500)N. 2ª Ensaio

Fazendo uma análise dos valores representados na ta  
bela 4, lembrando da existência de um espalhamento natural nos  
resultados dos ensaios de fadiga, da possibilidade de um erro  
inerente do processo empregado para fazer a leitura do compr  
imento da trinca e da dificuldade experimental de fazer esta lei  
tura para pequenos comprimentos da fissura, podemos verificar  
para os comprimentos da trinca de 6,00 mm, 10,00 mm, 14,00 mm e  
18,00 mm uma equivalência entre os resultados dos ensaios com  
sobrecargas e das amostras submetidas a um carregamento de am  
plitude constante, para todos os casos, sendo os valores do com  
primento da fissura praticamente os mesmos após 1000 ciclos.  
Assim, por exemplo, no carregamento  $(5000 \pm 2500)N + (8000 \pm$   
 $2500)N$  com a aplicação da sobrecarga em 14,00 mm, os comprimen  
tos da trinca após 1000 ciclos para o 19 e 29 ensaios são, res  
pectivamente, 14,30 mm e 14,32 mm e para o carregamento de am  
plitude constante  $(8000 \pm 2500)N$  após o mesmo número de ciclos  
a trinca atinge um comprimento de 14,27 mm.

As medidas do comprimento para as amostras ensaiadas  
no segundo programa com as aplicações das sobrecargas nos valo  
res de trinca de 10,00 mm e 14,00 mm, estão representados na ta  
bela 6, indicando uma concordância muito grande com os resulta  
dos dos carregamentos em amplitude constante à medida que a trin  
ca se afasta dos pontos de aplicação do carregamento de seqüên  
cia ascendente.

Os mesmos valores estão plotados nas figuras 47 a 50, nas  
quais é possível se observar que para esta ordem de grandeza de  
número de ciclos já ocorreu a estabilização do efeito da acele  
ração na taxa de propagação da trinca por fadiga.



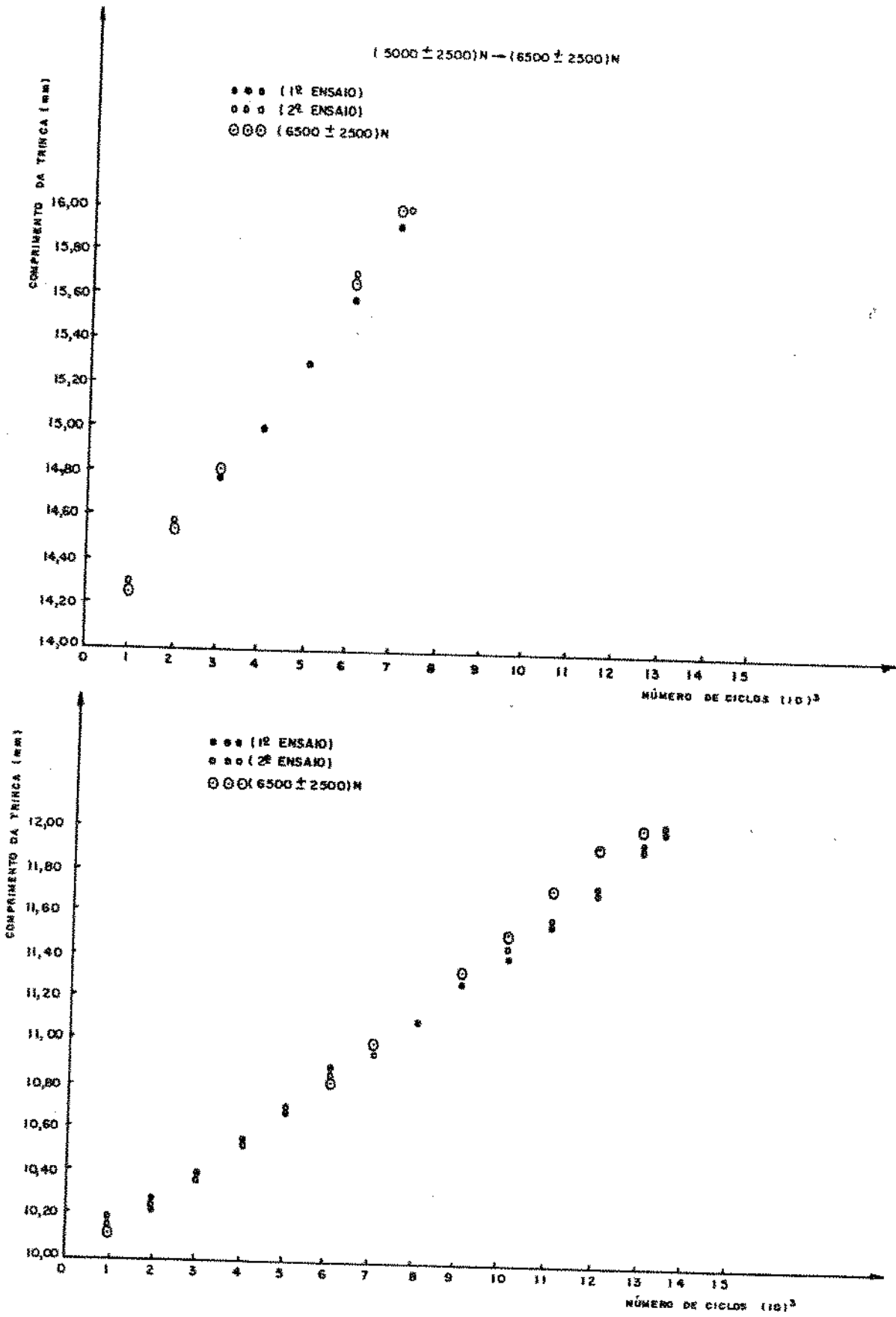


Figura 47 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.

(5000±2500)N + (6500±2500)N

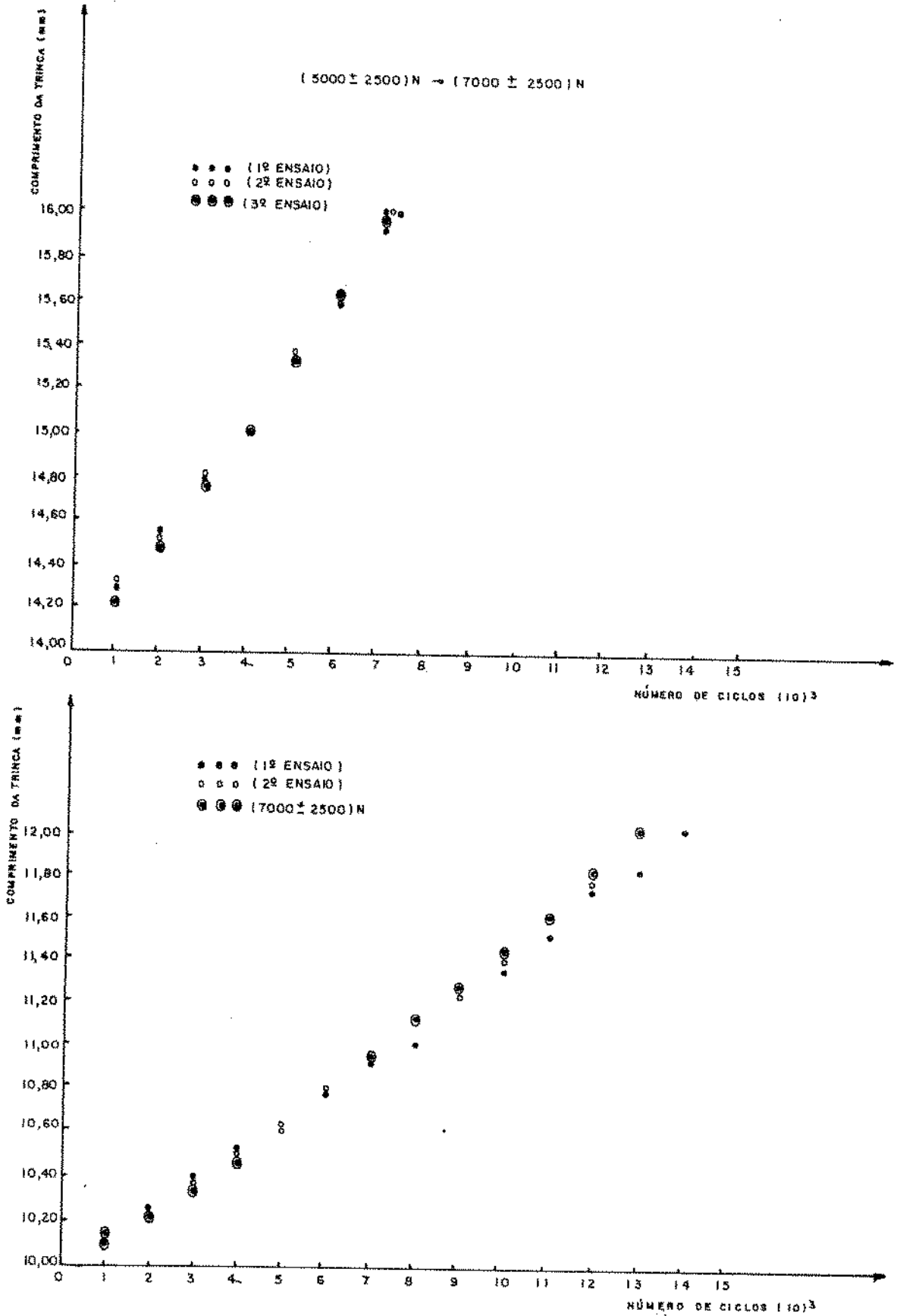


Figura 48 - Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N → (7000±2500)N

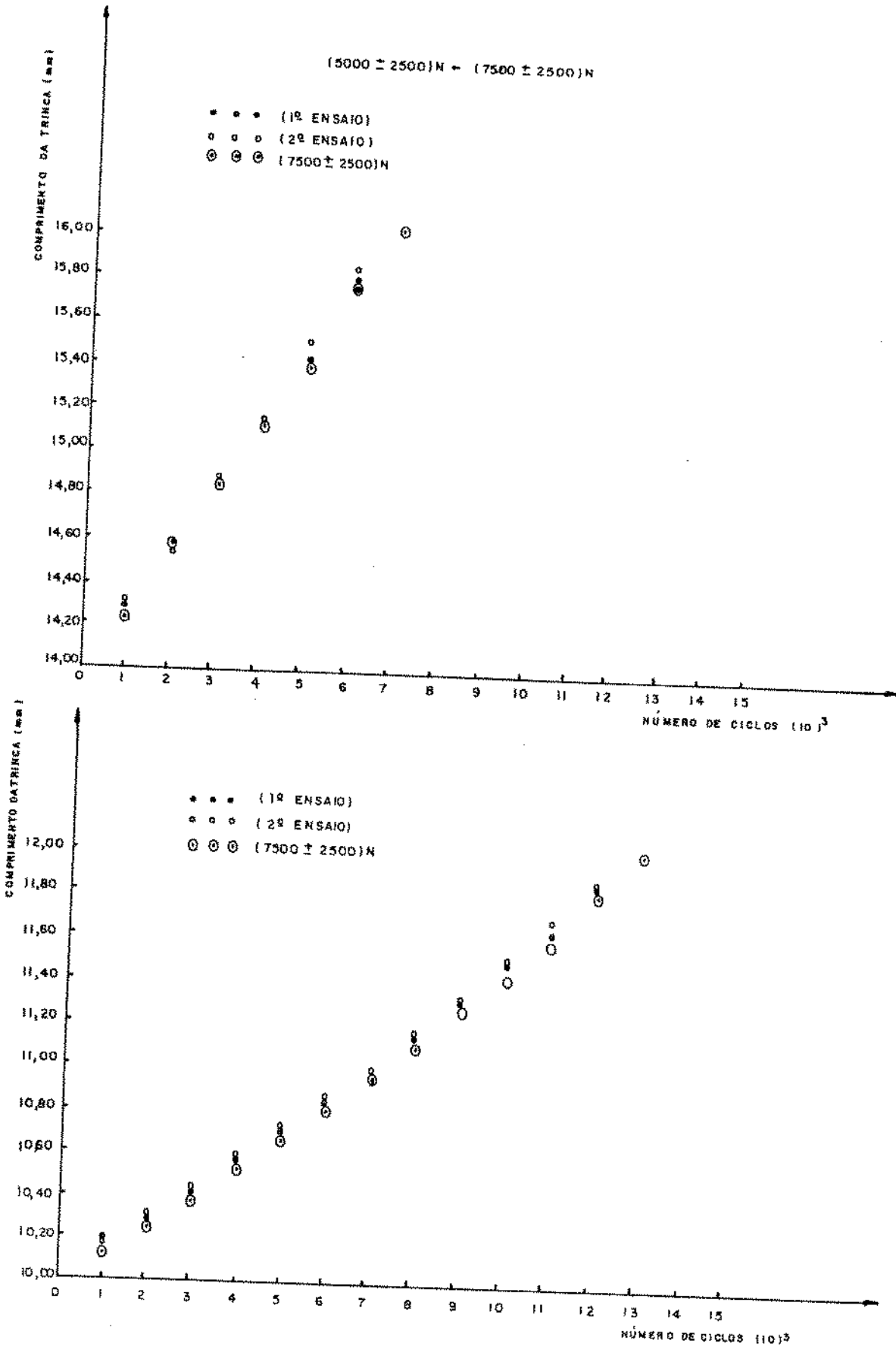


Figura 49 - Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 (5000±2500)N → (7500±2500)N

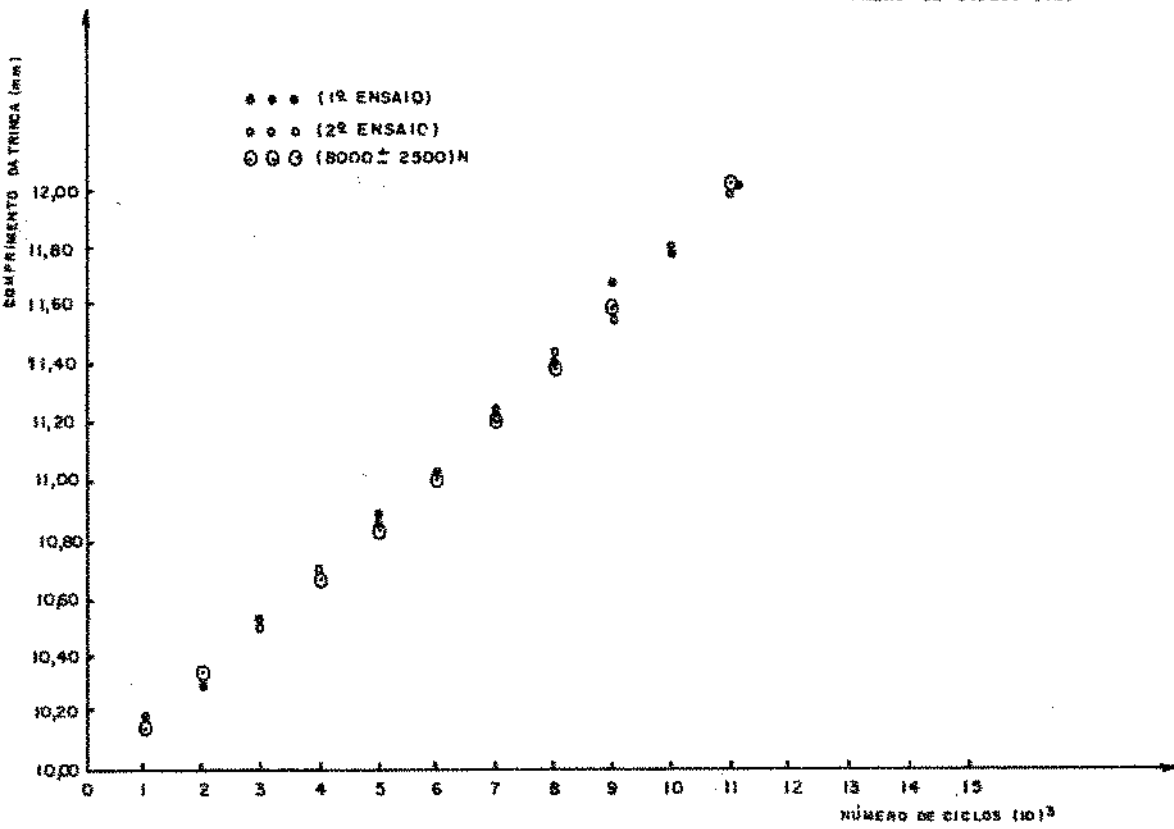
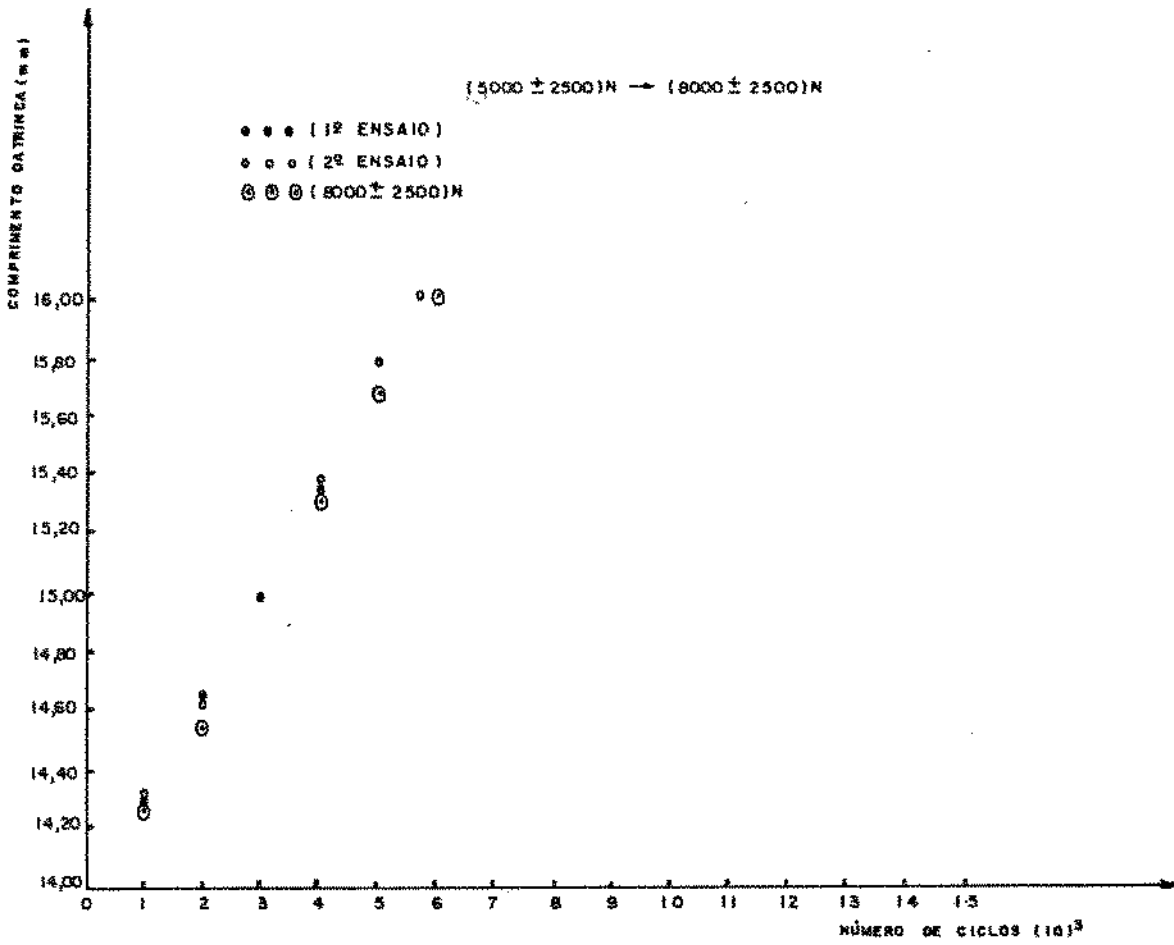


Figura 50 - Curvas comprimento da trinca versus número de ciclos.

(5000±2500)N → (8000±2500)N



Esta mesma observação pode ser feita para menores números de ciclos; assim, podemos verificar que para o carregamento  $(5000 \pm 2500)N + (8000 \pm 2500)N$  em 18,00 mm, os comprimentos da trinca após 100 ciclos assumem, respectivamente, os valores 18,06 mm e 18,05 mm e para o carregamento  $(8000 \pm 2500)N$  o comprimento da fissura após 100 ciclos é de 18,04 mm.

Estas observações levam a conclusão de que o efeito da aceleração na taxa de propagação de uma trinca por fadiga que efetivamente existe como resultado da aplicação de uma sobrecarga, se estabiliza rapidamente, ou seja, 100 ciclos é um intervalo muito grande para poder observá-lo. Estes resultados estão em concordância com as observações feitas por Matthews [38] que verificou uma estabilização mais rápida da aceleração no crescimento da trinca comparada com os efeitos do retardo, o que pode também ser verificado na tabela 5 que será comentada com mais detalhes quando for analisado o efeito do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga, e estão bem coerentes com as conclusões feitas por Jacoby [33] que também trabalhou com uma liga de alumínio 2024-T3. Desenvolvendo um trabalho muito interessante, J.C. McMillan e R.M.N. Pelloux [37] estudaram o efeito de programas de carregamento de amplitude variável na propagação da trinca por fadiga, através da observação do espaçamento das estrias de fadiga, segundo as seguintes condições :

- a) tensão máxima constante com três diferentes níveis de intervalo de tensão,
- b) intervalo de tensão constante com três e quatro níveis de tensão máxima,
- c) aplicação de carga pseudo-aleatória,

d) tensão máxima uniforme com picos de sobrecarga e subcarga.

O que pode ser verificado do trabalho desenvolvido, é que o espaçamento das estrias está relacionado à seqüência de carregamento e descarregamento de um ciclo de carga e que ocorre um espaçamento maior devido ao primeiro pico do bloco de sobrecargas.

Fazendo ainda uma análise da tabela 4, pode ser observado que para o comprimento da trinca de 22,00 mm, os ensaios realizados com a presença de sobrecargas apresentam dimensões da fissura menores do que as amostras submetidas a um carregamento de amplitude constante, em alguns casos.

Este comportamento nos leva a imaginar que 22,00 mm está dentro do diâmetro da zona plástica criada pelo bloco anterior.

A expressão para o cálculo do diâmetro da zona plástica é a seguinte:

$$2r_y = \frac{2}{d\pi} \left( \frac{K_{\text{máx}} S.c.}{\sigma_e} \right)^2 \quad (24)$$

onde:

$\bar{d} = 2$  - estado plano de tensão

$\bar{d} = 6$  - estado plano de deformação

$\sigma_e$  - limite de escoamento do material

O fator de correção de Gross foi usado nos cálculos do fator intensidade de tensão para a geometria da amostra empregada no desenvolvimento experimental do trabalho; assim:

$$K = \sigma \sqrt{a} \left| 1,99 - 0,41(a/w) + 18,70(a/w)^2 - 38,48(a/w)^3 + 53,85(a/w)^4 \right|$$

Nas tabelas 7 e 8 estão indicados, respectivamente, os valores dos fatores intensidade de tensão máximo e mínimo nos pontos do segundo programa de ensaios em que ocorreram carregamentos ascendentes e descendentes, para a carga de referência e todos os valores de sobrecarga e a dimensão da zona plástica na ponta da trinca para os comprimentos da fissura de 8,00mm, 12,00 mm, 16,00mm, 20,00mm e 24,00mm.

TABELA 7 - Valores dos fatores intensidade de tensão máximo e mínimo, MPa  $\sqrt{m}$

Cargas Comprimento da trinca (mm)	(5000±2500)N		(6500±2500)N		(7000±2500)N		(7500±2500)N		(8000±2500)N	
	Km <sub>máx</sub>	Km <sub>mín</sub>	Km <sub>máx</sub>	Km <sub>mín</sub>	Km <sub>máx</sub>	Km <sub>mín</sub>	Km <sub>máx</sub>	Km <sub>mín</sub>	Km <sub>máx</sub>	Km <sub>mín</sub>
6,00	10,83	3,61	12,99	5,77	13,72	6,50	14,44	7,22	15,16	7,94
8,00	13,07	4,36	15,69	6,97	16,56	7,84	17,43	8,72	18,30	9,59
10,00	15,36	5,12	18,44	8,19	19,46	9,22	20,49	10,24	21,51	11,27
12,00	17,77	5,92	21,33	9,48	22,51	10,66	23,70	11,85	24,88	13,03
14,00	20,35	6,78	24,42	10,85	25,77	12,21	27,13	13,56	28,49	14,92
16,00	23,13	7,71	27,76	12,34	29,30	13,88	30,84	15,42	32,38	16,96
18,00	26,17	8,72	31,40	13,96	33,15	15,70	34,89	17,45	36,64	19,19
20,00	29,50	9,83	35,40	15,73	37,37	17,70	39,34	19,67	41,31	21,64
22,00	33,19	11,06	39,83	17,70	42,04	19,91	44,25	22,12	46,46	24,34
24,00	37,28	12,43	44,74	19,88	47,22	22,37	49,71	24,85	52,19	27,34

TABELA 8 - Dimensões da zona plástica na ponta da trinca.

Comprimento da trinca (mm)	S O B R E C A R G A S			
	(6500±2500)N	(7000±2500)N	(7500±2500)N	(8000±2500)N
	(5000±2500)N	(5000±2500)N	(5000±2500)N	(5000±2500)N
8,00	0,451	0,503	0,557	0,614
12,00	0,834	0,929	1,029	1,135
16,00	1,412	1,573	1,743	1,922
20,00	2,297	2,559	2,836	3,127
24,00	3,668	4,087	4,528	4,993

De fato, observando a tabela 8 verificamos que o ponto de aplicação do carregamento de seqüência ascendente de 22,00 mm está, para todos os níveis de sobrecarga, dentro do diâmetro da zona plástica criada pelo bloco anterior.

Para poder confirmar a atuação da zona plástica no sentido de "desacelerar" o crescimento da trinca estando a amostra submetida a aplicação da sobrecarga, foi desenvolvido o terceiro programa de ensaios, representado na figura 51.

O terceiro programa de ensaios foi idealizado com a finalidade de espaçar os blocos de sobrecarga evitando assim a influência da zona plástica no crescimento da trinca na aplicação do carregamento ascendente. O que foi realizado em um corpo de prova no segundo programa de ensaios, será obtido aqui em duas amostras; portanto, no primeiro espécime os pontos de aplicação da sobrecarga são 10,00mm e 18,00mm e o retorno a carga de referência ocorre para os comprimentos da fissura de 12,00mm e 20,00mm, respectivamente e na segunda amostra os carregamentos

de seqüência ascendente ocorrem para os comprimentos da trinca de 14,00mm e 22,00mm ocorrendo a seqüência descendente para os comprimentos da fissura de 16,00mm e 24,00mm. Em ambos os casos, uma vez aplicados os dois blocos de sobrecarga, a amostra é ensaiada até a ruptura na carga de referência.

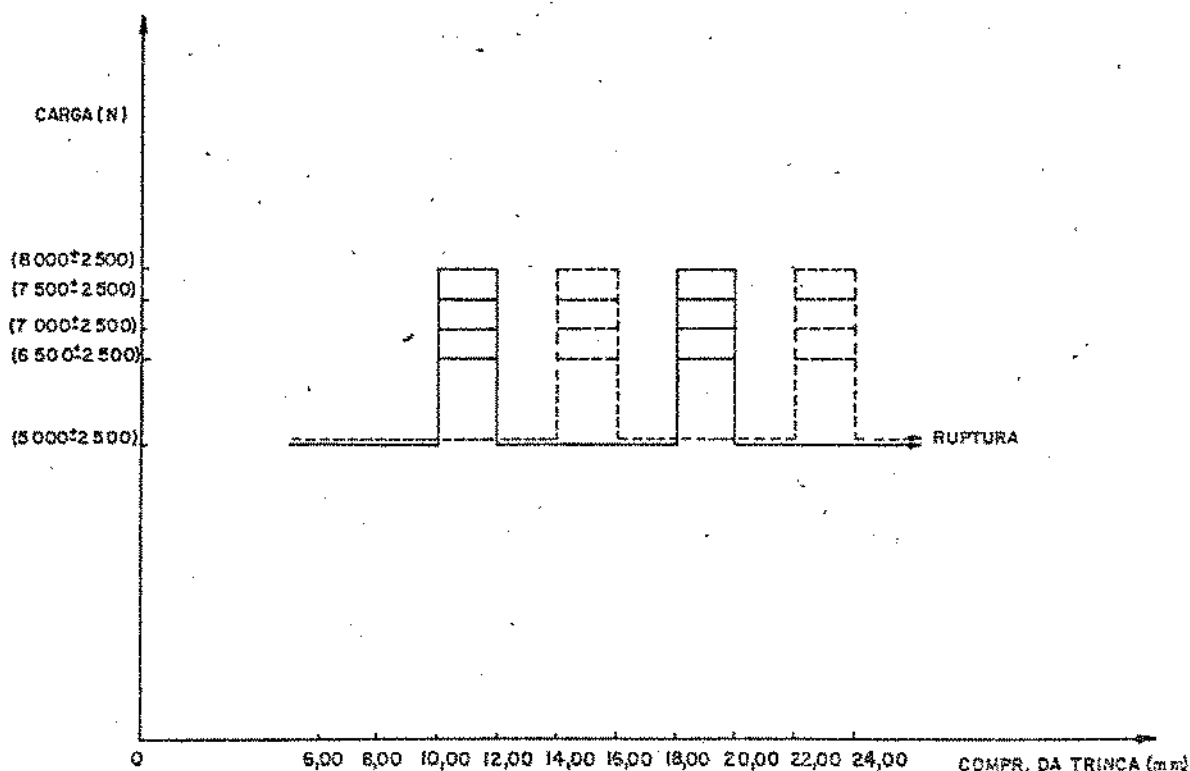


Figura 51 - Terceiro programa de ensaios.

Os procedimentos de ensaio e a seqüência empregada para medir os comprimentos da trinca foram os mesmos usados no segundo programa de ensaios.

Nas figuras 52 a 59 podemos observar os resultados obtidos e na tabela 9 estão indicados os valores do comprimento da trinca para o segundo e o terceiro programa de ensaios, além dos resultados das amostras testadas em carregamento de amplitude constante. Podemos verificar que para os comprimentos da fissura de 6,00mm, 10,00mm, 14,00mm e 18,00mm os resultados do segundo e terceiro programa de ensaios estão bem próximos, reafirmando as conclusões já obtidas; para o comprimento da trinca de 22,00mm está confirmada a atuação da zona plástica no sentido de "desacelerar" o crescimento da fissura.

Uma vez verificada a rápida estabilização da aceleração no crescimento da fissura devido a presença de sobrecargas, para o desenvolvimento do modelo teórico é necessário obter, experimentalmente, dados numéricos que possam informar a respeito do mecanismo da aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga; ou seja, verificar como ocorre o crescimento da fissura após a passagem para a carga mais alta. Isto foi conseguido com a realização do quarto programa de ensaios, representado na figura 60.

O objetivo dos ensaios realizados no quarto programa foi observar, de uma maneira mais precisa, o crescimento da trinca no carregamento de seqüência ascendente para os pontos de aplicação da sobrecarga em 10,00mm e 18,00mm. Para cumprir com as finalidades desejadas, foi necessário reduzir a freqüência dos testes para 1Hz.

Os resultados experimentais observados estão indicados na tabela 10, juntamente com os valores obtidos na mesma freqüência, para os carregamentos de amplitude constante. É importante fazer aqui um comentário com relação a grande dificuldade

Tabela 9 - Medidas do comprimento da trinca após a aplicação das sobrecargas.

Comp.	Nº	(5000±2500)N+(6500±2500)N				(6500±2500)N	(5000±2500)N+(7000±2500)N				(7000±2500)N	(5000±2500)N+(7500±2500)N				(7500±2500)N	(5000±2500)N+(8000±2500)N				(8000±2500)N
		1º		2º			1º		2º			1º		2º			1º		2º		
		Ensaio	Ensaio	18,00	14,00		Ensaio	Ensaio	18,00	14,00		Ensaio	Ensaio	18,00	14,00		Ensaio	Ensaio	18,00	14,00	
6,00	100	6,01	6,01			6,01	6,02	6,02			6,01	6,02	6,02			6,01	6,02	6,03			6,01
	200	6,01	6,01			6,01	6,02	6,02			6,01	6,02	6,02			6,02	6,03	6,03			6,01
	300	6,01	6,02			6,01	6,02	6,03			6,02	6,02	6,03			6,02	6,03	6,03			6,02
	400	6,02	6,02			6,02	6,03	6,03			6,02	6,03	6,03			6,03	6,04	6,05			6,02
	500	6,02	6,02			6,02	6,04	6,04			6,03	6,03	6,03			6,03	6,06	6,07			6,03
	600	6,03	6,03			6,02	6,04	6,04			6,03	6,03	6,04			6,03	6,06	6,07			6,04
	700	6,03	6,04			6,03	6,05	6,05			6,03	6,04	6,04			6,04	6,08	6,07			6,04
	800	6,04	6,04			6,03	6,05	6,06			6,04	6,06	6,05			6,05	6,08	6,09			6,06
	900	6,05	6,05			6,04	6,06	6,06			6,05	6,06	6,07			6,06	6,09	6,09			6,07
	1000	6,06	6,05			6,04	6,07	6,08			6,06	6,07	6,08			6,07	6,10	6,11			6,08
10,00	100	10,06	10,04	10,02		10,01	10,02	10,02	10,02		10,01	10,02	10,02	10,04		10,02	10,02	10,02	10,03		10,01
	200	10,08	10,04	10,04		10,01	10,04	10,04	10,04		10,02	10,02	10,04	10,07		10,03	10,04	10,04	10,04		10,02
	300	10,09	10,04	10,06		10,02	10,04	10,05	10,07		10,03	10,05	10,05	10,10		10,04	10,08	10,06	10,06		10,03
	400	10,11	10,04	10,09		10,02	10,05	10,06	10,09		10,04	10,08	10,07	10,11		10,06	10,11	10,07	10,08		10,05
	500	10,11	10,07	10,11		10,03	10,06	10,06	10,11		10,05	10,10	10,10	10,12		10,07	10,15	10,08	10,11		10,06
	600	10,11	10,07	10,11		10,05	10,08	10,09	10,12		10,06	10,12	10,11	10,12		10,08	10,15	10,11	10,13		10,08
	700	10,11	10,11	10,13		10,07	10,12	10,12	10,13		10,07	10,14	10,12	10,13		10,09	10,16	10,12	10,13		10,09
	800	10,14	10,11	10,14		10,08	10,15	10,15	10,13		10,09	10,16	10,15	10,14		10,11	10,18	10,13	10,15		10,10
	900	10,16	10,11	10,14		10,09	10,15	10,16	10,14		10,10	10,17	10,16	10,15		10,13	10,18	10,14	10,17		10,12
	1000	10,18	10,16	10,16		10,11	10,17	10,17	10,17		10,11	10,18	10,17	10,17		10,14	10,18	10,16	10,18		10,14
14,00	100	14,05	14,03		14,03	14,02	14,04	14,03		14,05	14,02	14,06	14,04		14,08	14,03	14,06	14,04		14,04	14,02
	200	14,06	14,03		14,06	14,04	14,07	14,04		14,08	14,03	14,07	14,08		14,13	14,06	14,08	14,06		14,09	14,04
	300	14,08	14,05		14,08	14,06	14,11	14,10		14,10	14,08	14,10	14,10		14,17	14,08	14,12	14,09		14,12	14,08
	400	14,12	14,10		14,11	14,09	14,13	14,13		14,12	14,11	14,14	14,12		14,19	14,11	14,16	14,12		14,13	14,08
	500	14,15	14,14		14,15	14,12	14,14	14,20		14,17	14,12	14,16	14,16		14,20	14,13	14,18	14,14		14,16	14,14
	600	14,21	14,17		14,17	14,13	14,18	14,20		14,23	14,14	14,20	14,18		14,22	14,16	14,21	14,16		14,17	14,16
	700	14,25	14,17		14,23	14,16	14,19	14,22		14,26	14,16	14,21	14,22		14,26	14,19	14,22	14,18		14,19	14,18
	800	14,27	14,20		14,26	14,19	14,20	14,26		14,31	14,18	14,22	14,24		14,28	14,22	14,24	14,23		14,22	14,20
	900	14,27	14,20		14,28	14,25	14,21	14,30		14,34	14,19	14,26	14,26		14,32	14,23	14,27	14,27		14,26	14,23
	1000	14,31	14,26		14,34	14,27	14,29	14,32		14,38	14,22	14,29	14,30		14,36	14,23	14,30	14,32		14,28	14,27
18,00	100	18,05	18,08	18,05		18,04	18,11	18,06	18,07		18,07	18,06	18,07	18,06		18,04	18,06	18,05	18,11		18,04
	200	18,07	18,14	18,10		18,08	18,17	18,13	18,16		18,12	18,12	18,13	18,12		18,06	18,17	18,10	18,20		18,07
	300	18,16	18,18	18,16		18,15	18,21	18,19	18,21		18,16	18,17	18,18	18,18		18,12	18,26	18,16	18,28		18,14
	400	18,21	18,25	18,21		18,21	18,29	18,27	18,25		18,24	18,24	18,25	18,24		18,20	18,31	18,24	18,37		18,22
	500	18,28	18,30	18,27		18,26	18,33	18,32	18,33		18,28	18,30	18,31	18,31		18,27	18,36	18,30	18,42		18,30
	600	18,33	18,33	18,32		18,31	18,37	18,38	18,38		18,34	18,36	18,38	18,37		18,34	18,43	18,37	18,48		18,35
	700	18,39	18,36	18,37		18,39	18,42	18,43	18,44		18,37	18,40	18,42	18,41		18,38	18,47	18,46	18,51		18,39
	800	18,44	18,41	18,43		18,46	18,49	18,48	18,50		18,42	18,46	18,48	18,46		18,45	18,52	18,54	18,57		18,50
	900	18,50	18,43	18,47		18,48	18,53	18,53	18,55		18,49	18,52	18,54	18,51		18,51	18,57	18,61	18,64		18,53
	1000	18,56	18,49	18,53		18,54	18,57	18,62	18,60		18,55	18,59	18,60	18,56		18,57	18,64	18,67	18,72		18,59
22,00	100	22,11	22,13		22,19	22,12	22,13	22,14		22,22	22,15	22,14	22,15		22,25	22,09	22,12	22,13		22,21	22,14
	200	22,25	22,22		22,37	22,21	22,21	22,27		22,33	22,23	22,25	22,26		22,46	22,23	22,25	22,28		22,44	22,26
	300	22,40	22,32		22,47	22,28	22,28	22,40		22,48	22,28	22,37	22,38		22,57	22,31	22,37	22,42		22,60	22,37
	400	22,46	22,40		22,59	22,46	22,38	22,54		22,59	22,41	22,50	22,51		22,68	22,44	22,49	22,49		22,75	22,49
	500	22,55	22,50		22,77	22,55	22,45	22,69		22,68	22,50	22,61	22,63		22,90	22,55	22,58	22,63		22,93	22,61
	600	22,68	22,63		22,92	22,69	22,53	22,78		22,80	22,60	22,76	22,77		23,04	22,65	22,76	22,69		23,07	22,73
	700	22,76	22,69		23,11	22,81	22,61	22,93		22,94	22,72	22,94	22,93		23,26	22,79	22,97	22,83		23,18	22,85
	800	22,86	22,84		23,24	22,92	22,75	23,05		23,05	22,86	23,05	23,07		23,42	22,90	23,08	22,94		23,29	22,94
	900	23,00	22,91		23,49	23,08	22,83	23,17		23,24	23,00	23,18	23,19		23,60	23,02	23,17	23,06		23,47	23,07
	1000	23,07	23,04		23,63	23,19	22,92	23,33		23,41	23,10	23,33	23,34		23,84	23,15	23,35	23,19		23,69	23,21

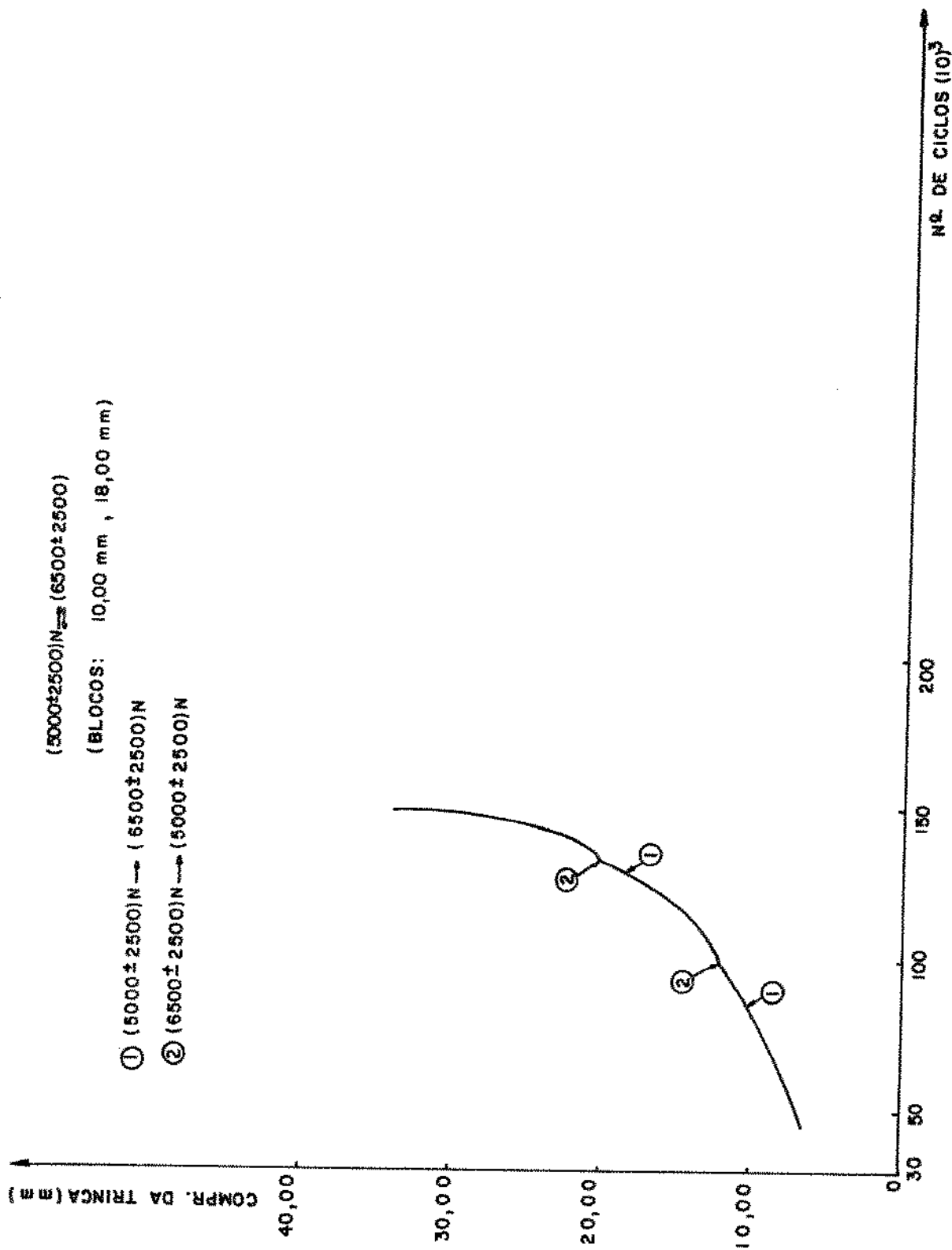


Figura 52 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 (5000±2500)N → (6500±2500)N. Blocos 10,00mm, 18,00mm.



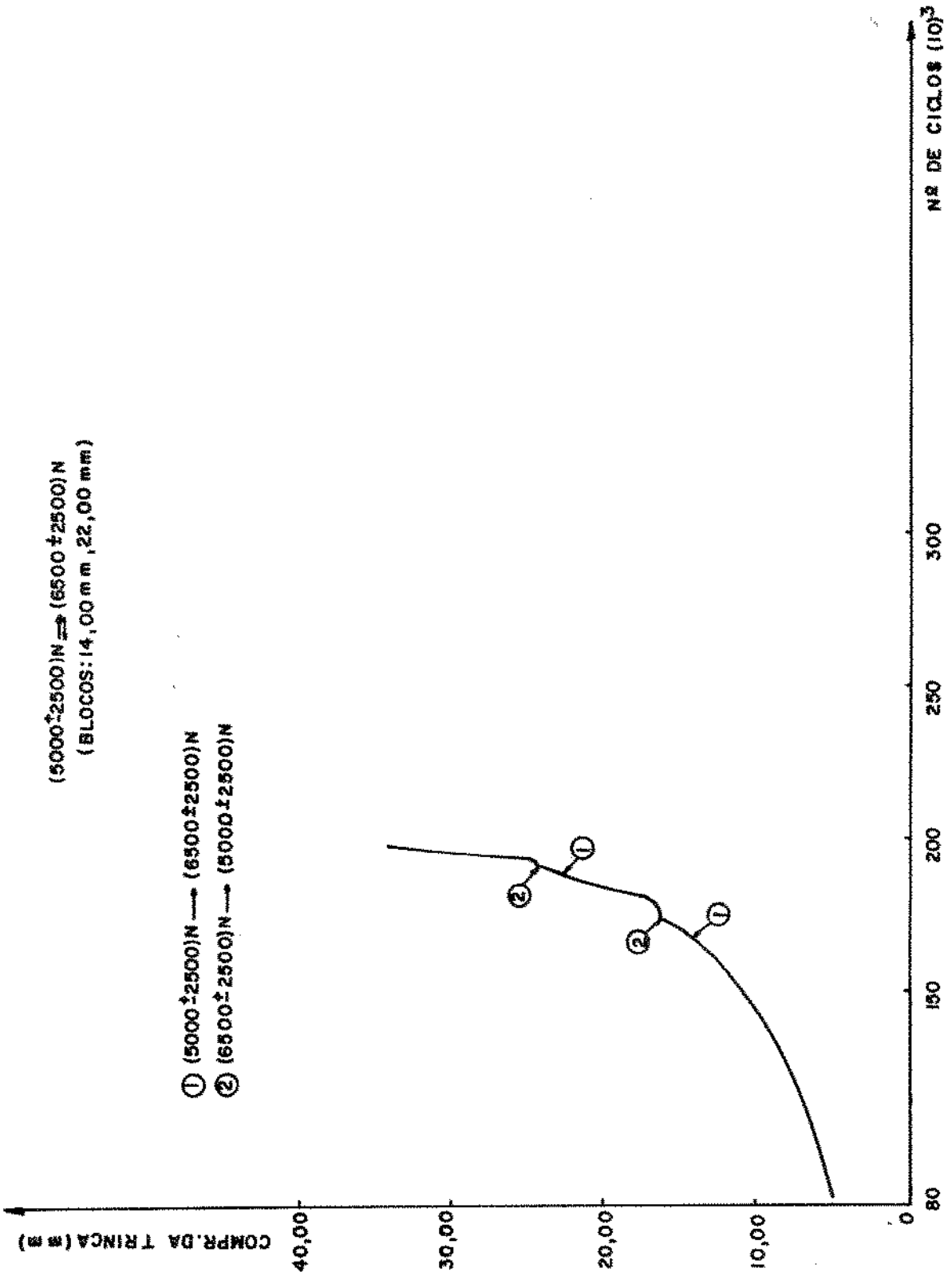


Figura 53 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000 ± 2500)N → (6500 ± 2500)N. Blocos 14,00mm, 22,00mm.

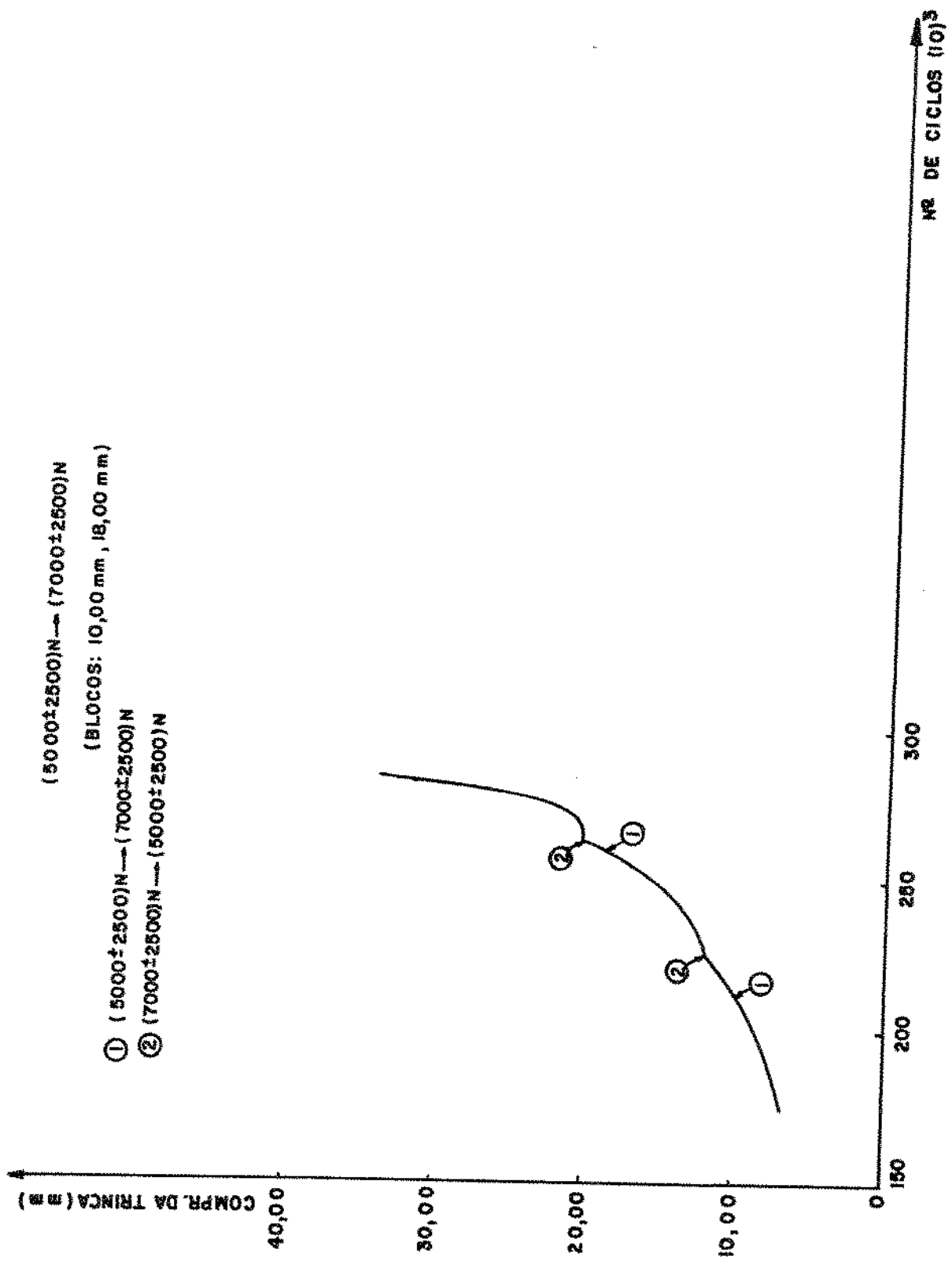


Figura 54 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N + (7000±2500)N. Blocos 10,00mm, 18,00mm.

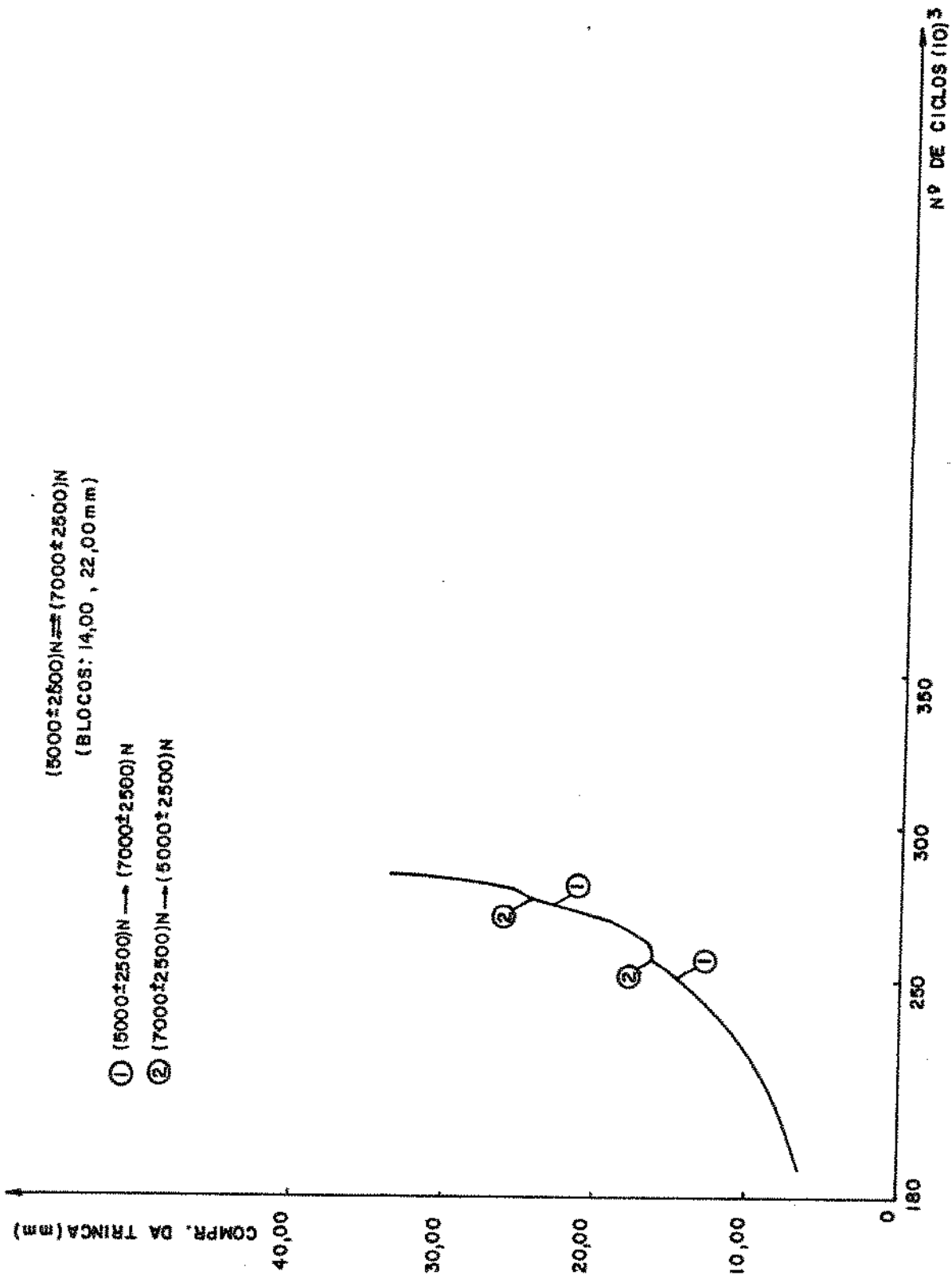


Figura 55 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
(5000±2500)N + (7000±2500)N. Blocos 14,00mm, 22,00mm.

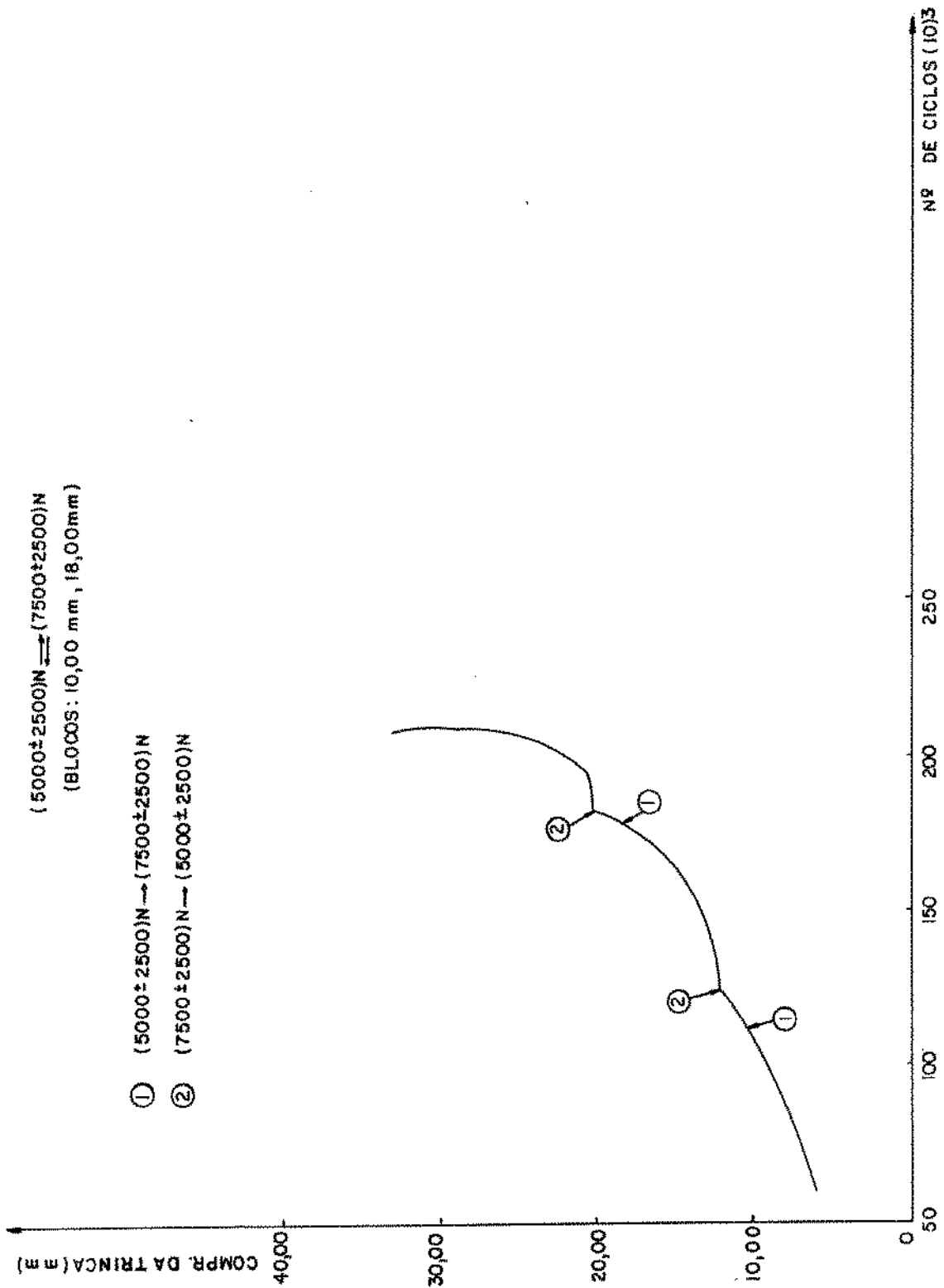


Figura 56 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 $(5000 \pm 2500)N \rightarrow (7500 \pm 2500)N$ . Blocos 10,00mm, 18,00mm.

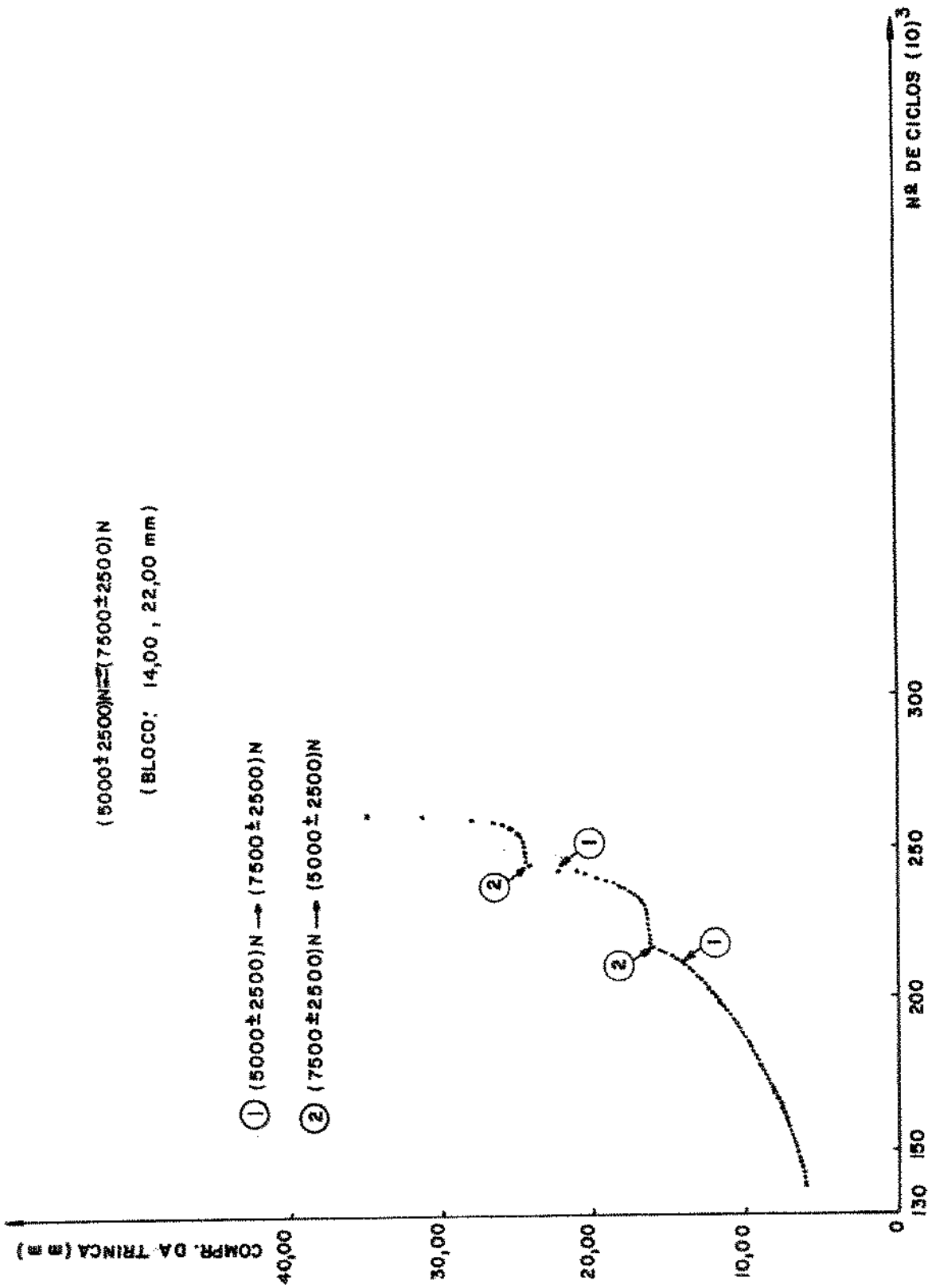


Figura 57 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 $(5000 \pm 2500)N \rightleftharpoons (7500 \pm 2500)N$ . Blocos 14,00mm, 22,00mm.

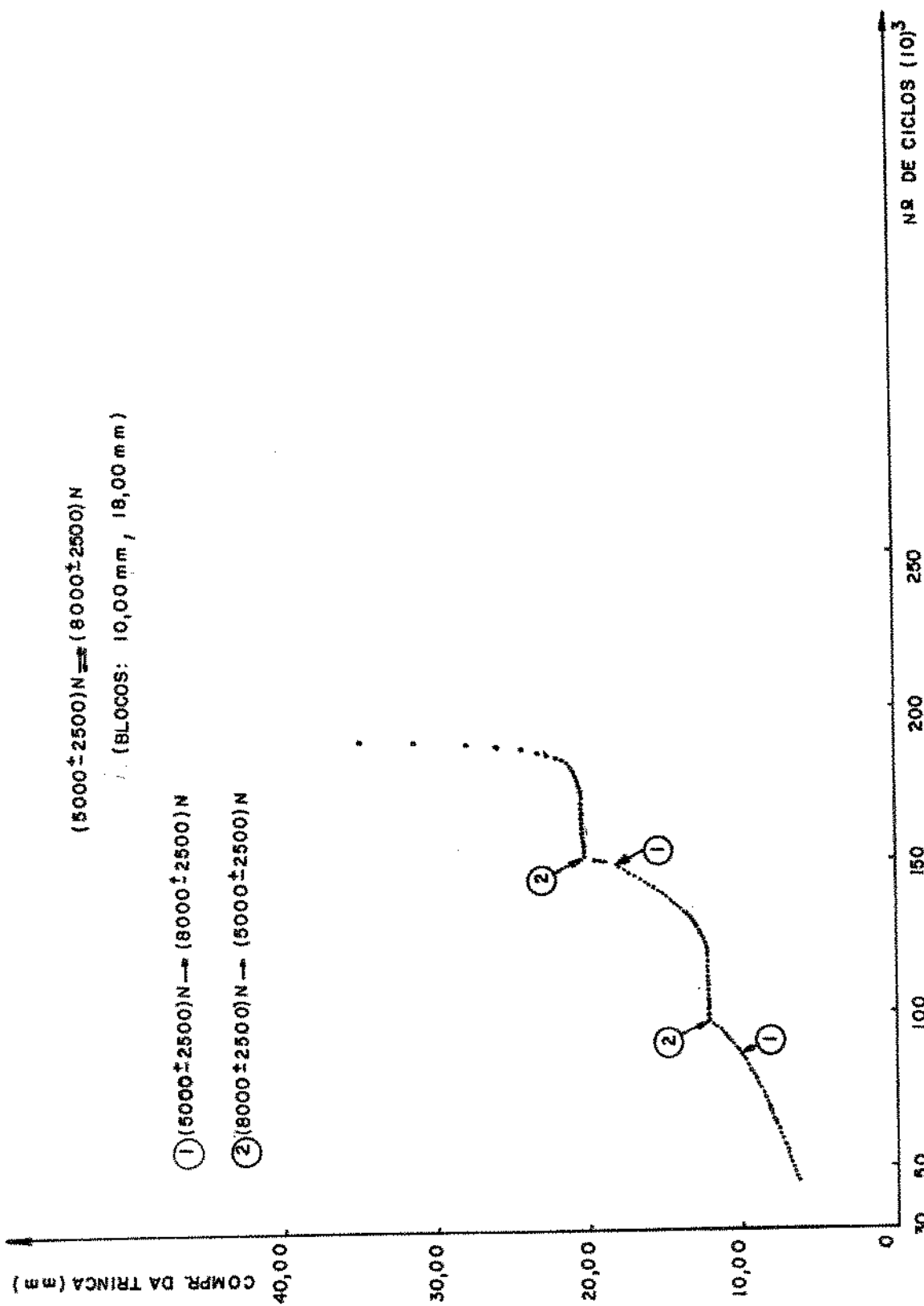


Figura 58 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 $(5000 \pm 250)N \rightarrow (8000 \pm 250)N$ . Blocos 10,00mm, 18,00mm.

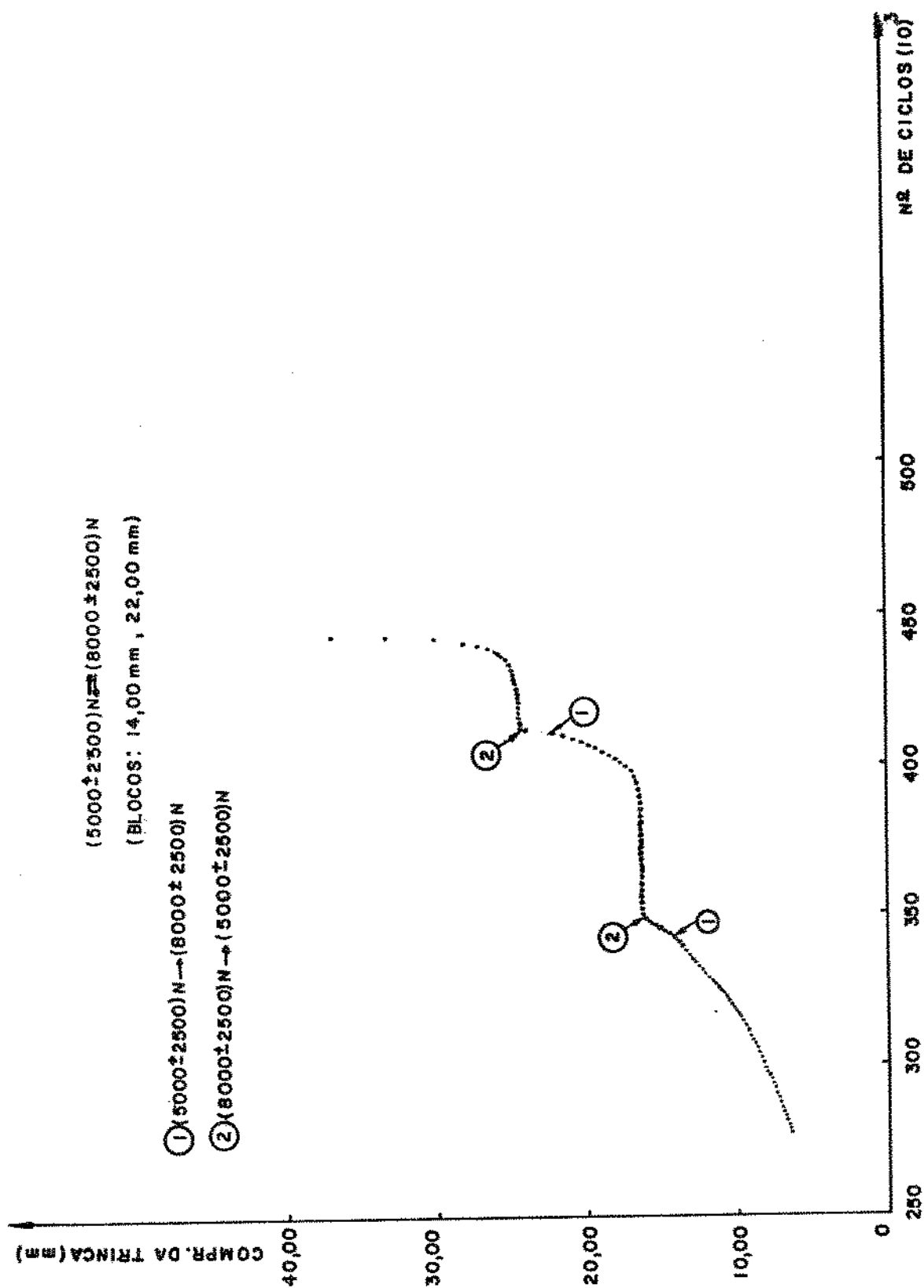


Figura 59 - Curva comprimento da trinca versus número de ciclos.  
 $(5000 \pm 250)N \rightarrow (8000 \pm 250)N$ . Blocos 14,00mm, 22,00mm.

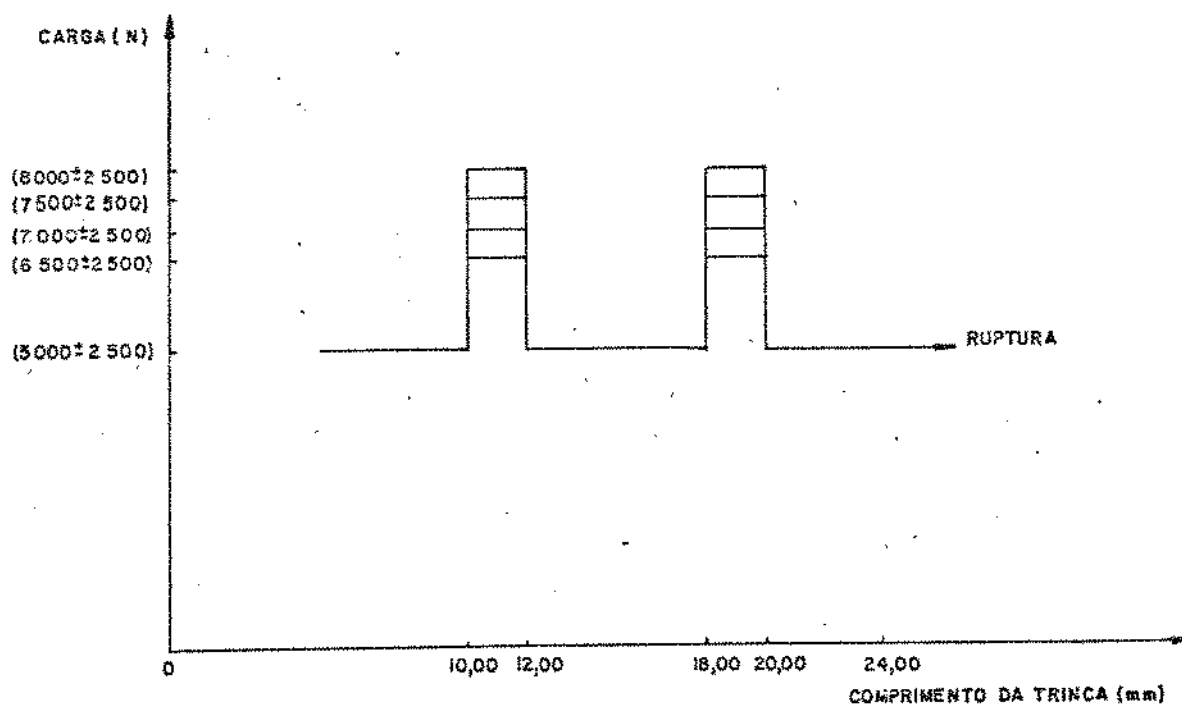


Figura 60 - Quarto programa de ensaios.

prática encontrada para se fazer as leituras do comprimento da trinca para os vários ensaios realizados no programa em questão, principalmente próximo ao ponto de aplicação da sobrecarga, de maneira que os dados presentes na tabela 10 não devem ser criteriosamente avaliados no sentido numérico, mas sim com o objetivo de se encontrar um comportamento padrão no crescimento da trinca para os vários níveis de sobrecarga.

A conclusão extremamente importante obtida através da análise dos resultados do quarto programa de ensaios é de que ocorre um maior crescimento da trinca no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga comparado com o valor obtido no carregamento de amplitude constante; além disso, podemos verificar uma parada no crescimento da trinca por um determinado valor do



Tabela 10 - Valores do comprimento da trinca na frequência de ensaio de 1Hz.

Comp Tr.	Nº Cicl.	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+	(5000±2500)N+
		(6500±2500)N	(6500±2500)N	(7000±2500)N	(7000±2500)N	(7500±2500)N	(7500±2500)N	(8000±2500)N	(8000±2500)N
18,00	1	18,02	18,00	18,02	18,00	18,03	18,00	18,03	18,00
	10	18,02	18,00	18,02	18,00	18,03	18,00	18,03	18,00
	20	18,02	18,00	18,02	18,00	18,03	18,00	18,03	18,02
	30	18,02	18,00	18,02	18,02	18,03	18,02	18,04	18,02
	40	18,02	18,02	18,03	18,02	18,04	18,02	18,04	18,02
	50	18,03	18,02	18,03	18,03	18,04	18,02	18,04	18,03
	60	18,03	18,03	18,04	18,03	18,04	18,03	18,05	18,04
	70	18,04	18,03	18,04	18,04	18,04	18,04	18,05	18,04
	80	18,04	18,04	18,06	18,04	18,06	18,04	18,06	18,05
	90	18,05	18,04	18,06	18,05	18,06	18,04	18,06	18,05
	100	18,06	18,05	18,08	18,06	18,07	18,06	18,08	18,06
	110	18,06	18,05	18,08	18,06	18,07	18,06	18,08	18,06
	120	18,08	18,06	18,08	18,06	18,08	18,07	18,09	18,06
	130	18,09	18,06	18,09	18,07	18,08	18,08	18,09	18,09
	140	18,09	18,06	18,10	18,08	18,08	18,08	18,10	18,09
	150	18,11	18,07	18,10	18,08	18,10	18,09	18,10	18,10
	160	18,11	18,07	18,10	18,08	18,10	18,09	18,12	18,10
	170	18,12	18,08	18,12	18,09	18,13	18,10	18,14	18,11
	180	18,13	18,08	18,14	18,09	18,13	18,10	18,16	18,11
	190	18,13	18,09	18,16	18,11	18,13	18,11	18,16	18,12
200	18,15	18,10	18,17	18,13	18,15	18,13	18,17	18,14	
300	18,18	18,16	18,19	18,17	18,18	18,18	18,22	18,20	
400	18,26	18,23	18,27	18,26	18,26	18,25	18,30	18,28	
500	18,33	18,28	18,33	18,28	18,32	18,30	18,35	18,32	
600	18,41	18,36	18,39	18,36	18,40	18,36	18,42	18,40	
700	18,44	18,42	18,44	18,40	18,43	18,42	18,48	18,46	
800	18,52	18,48	18,51	18,44	18,50	18,48	18,54	18,52	
900	18,59	18,53	18,55	18,51	18,58	18,55	18,60	18,60	
1000	18,64	18,59	18,62	18,58	18,62	18,60	18,66	18,64	
10,00	1	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00
	10	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00
	20	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00
	30	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00
	40	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00
	50	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,01
	60	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,02	10,01
	70	10,01	10,00	10,02	10,00	10,02	10,00	10,03	10,01
	80	10,01	10,00	10,02	10,00	10,03	10,01	10,03	10,01
	90	10,01	10,00	10,02	10,00	10,03	10,01	10,03	10,02
	100	10,02	10,01	10,02	10,00	10,03	10,01	10,03	10,02
	110	10,02	10,01	10,02	10,02	10,03	10,01	10,03	10,02
	120	10,02	10,01	10,03	10,02	10,03	10,02	10,03	10,02
	130	10,02	10,01	10,03	10,02	10,03	10,02	10,03	10,02
	140	10,02	10,01	10,03	10,02	10,03	10,03	10,04	10,02
	150	10,02	10,01	10,03	10,02	10,03	10,03	10,04	10,02
	160	10,02	10,01	10,03	10,03	10,03	10,03	10,04	10,04
	170	10,02	10,02	10,03	10,03	10,03	10,03	10,04	10,04
	180	10,02	10,02	10,03	10,03	10,04	10,03	10,04	10,04
	190	10,02	10,02	10,03	10,03	10,04	10,04	10,04	10,04
200	10,03	10,02	10,04	10,03	10,04	10,04	10,04	10,04	
300	10,05	10,03	10,06	10,05	10,06	10,06	10,08	10,06	
400	10,06	10,05	10,06	10,07	10,08	10,08	10,09	10,07	
500	10,07	10,06	10,08	10,08	10,09	10,10	10,11	10,11	
600	10,09	10,08	10,09	10,10	10,10	10,11	10,13	10,12	
700	10,11	10,09	10,12	10,11	10,14	10,13	10,13	10,12	
800	10,11	10,09	10,12	10,13	10,14	10,15	10,16	10,14	
900	10,12	10,11	10,15	10,14	10,15	10,16	10,17	10,17	
1000	10,14	10,13	10,18	10,16	10,18	10,18	10,19	10,18	

número de ciclos, seguido por um crescimento discreto da fissura. Os resultados obtidos dos ensaios com sobrecargas e dos carregamentos de amplitude não variável estão, com exceção da variação observada no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga, muito próximos, repetindo portanto os comportamentos observados no segundo e terceiro programa de ensaios que indicam uma rápida estabilização do efeito da aceleração no crescimento da trinca. A parada no crescimento da fissura deve ser interpretada como variações de comprimento muito pequenas, não observadas experimentalmente.

Estas conclusões, também verificadas por Matthews [38], Jacoby [33], J.C.McMillan e R.M.N. Pelloux [37], levam ao desenvolvimento de um modelo teórico que representa a aceleração na taxa de propagação de uma trinca por fadiga, apresentado a seguir.

#### 4.4.1 MODELO PARA A ACELERAÇÃO NO CRESCIMENTO DA FISSURA

Fazendo uma análise da figura 33, verificamos a eficiência da equação de Forman  $\left( \frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)Kc-\Delta K} \right)$  na representação dos dados das curvas em carregamentos de amplitude constante. Esta observação pode ser sentida de uma melhor maneira, através do estudo da tabela 11 que apresenta os valores do comprimento da trinca nos pontos de aplicação das sobrecargas para o segundo e terceiro programa de ensaios, os resultados dos carregamentos de amplitude constante e os dados teóricos do comprimento da fissura obtidos pela equação de Forman.

Podemos verificar na tabela 11, que os valores teóricos do comprimento da trinca fornecidos pela expressão de Forman

Tabela 11 - Comparação entre os resultados experimentais do com  
primento da trinca e os valores fornecidos pela equa  
ção de Forman.

Camp	Tr.	Cicl.	(5000±2500)N+(6500±2500)N				2500N	(6500 ± (5000±2500)N+(7000±2500)N				2500N	(7000 ± (5000±2500)N+(7500±2500)N				2500N	(5000±2500)N+(8000±2500)N				2500N
			19	29	39	Forman		19	29	39	Forman		19	29	39	Forman		19	29	39	Forman	
6.00	100	6,01	6,01		6,0068	6,01	6,02	6,02		6,0072	6,01	6,02	6,02		6,0072	6,01	6,02	6,03		6,0081	6,00	
	200	6,01	6,01		6,0136	6,01	6,02	6,02		6,0144	6,01	6,02	6,02		6,0154	6,02	6,03	6,03		6,0163	6,01	
	300	6,01	6,02		6,0204	6,01	6,02	6,03		6,0217	6,02	6,02	6,03		6,0230	6,02	6,03	6,03		6,0244	6,01	
	400	6,02	6,02		6,0272	6,02	6,03	6,03		6,0289	6,02	6,03	6,03		6,0308	6,03	6,04	6,05		6,0326	6,02	
	500	6,02	6,02		6,0339	6,02	6,04	6,04		6,0362	6,03	6,03	6,03		6,0385	6,03	6,06	6,07		6,0408	6,03	
	600	6,03	6,03		6,0408	6,02	6,04	6,04		6,0435	6,03	6,03	6,04		6,0462	6,03	6,06	6,07		6,0490	6,04	
	700	6,03	6,04		6,0477	6,03	6,05	6,05		6,0508	6,03	6,04	6,04		6,0539	6,04	6,08	6,07		6,0572	6,04	
	800	6,04	6,04		6,0545	6,03	6,05	6,06		6,0581	6,04	6,06	6,05		6,0617	6,05	6,08	6,09		6,0655	6,06	
	900	6,05	6,05		6,0613	6,04	6,06	6,06		6,0654	6,05	6,06	6,07		6,0695	6,06	6,09	6,09		6,0737	6,07	
	1000	6,06	6,05		6,0682	6,04	6,07	6,08		6,0727	6,06	6,07	6,08		6,0773	6,07	6,10	6,11		6,0820	6,08	
10.00	100	10,02	10,04	10,02	10,014	10,01	10,02	10,02	10,02	10,015	10,02	10,02	10,02	10,04	10,016	10,02	10,02	10,03	10,03	10,017	10,01	
	200	10,08	10,04	10,04	10,029	10,01	10,04	10,04	10,04	10,031	10,02	10,04	10,04	10,07	10,033	10,03	10,04	10,04	10,04	10,035	10,02	
	300	10,09	10,04	10,06	10,043	10,02	10,04	10,05	10,07	10,046	10,03	10,05	10,05	10,10	10,049	10,04	10,08	10,06	10,06	10,052	10,03	
	400	10,11	10,04	10,09	10,057	10,02	10,05	10,06	10,09	10,061	10,04	10,08	10,07	10,11	10,066	10,06	10,11	10,08	10,08	10,069	10,05	
	500	10,11	10,07	10,11	10,072	10,03	10,06	10,06	10,11	10,077	10,05	10,10	10,10	10,12	10,082	10,07	10,15	10,08	10,11	10,087	10,06	
	600	10,11	10,07	10,11	10,086	10,05	10,08	10,09	10,12	10,092	10,06	10,12	10,11	10,12	10,099	10,08	10,15	10,11	10,13	10,105	10,08	
	700	10,11	10,11	10,13	10,100	10,07	10,12	10,12	10,13	10,108	10,07	10,14	10,12	10,13	10,115	10,09	10,16	10,12	10,13	10,123	10,09	
	800	10,14	10,11	10,14	10,115	10,08	10,15	10,15	10,13	10,123	10,09	10,16	10,15	10,14	10,132	10,11	10,18	10,13	10,15	10,141	10,10	
	900	10,16	10,11	10,14	10,129	10,09	10,15	10,16	10,14	10,139	10,10	10,17	10,16	10,15	10,149	10,13	10,18	10,14	10,17	10,158	10,12	
	1000	10,18	10,16	10,16	10,144	10,11	10,17	10,17	10,17	10,155	10,11	10,18	10,17	10,17	10,165	10,14	10,18	10,16	10,18	10,176	10,14	
14.00	100	14,05	14,03	14,03	14,027	14,02	14,04	14,03	14,05	14,029	14,02	14,06	14,04	14,08	14,031	14,03	14,06	14,04	14,04	14,033	14,02	
	200	14,06	14,03	14,06	14,054	14,04	14,07	14,04	14,08	14,058	14,03	14,07	14,08	14,13	14,062	14,06	14,08	14,06	14,09	14,067	14,04	
	300	14,08	14,05	14,08	14,081	14,06	14,11	14,10	14,10	14,087	14,08	14,10	14,10	14,17	14,093	14,08	14,12	14,09	14,12	14,100	14,08	
	400	14,12	14,10	14,11	14,108	14,09	14,13	14,13	14,12	14,116	14,11	14,14	14,12	14,19	14,125	14,11	14,16	14,12	14,13	14,134	14,08	
	500	14,15	14,14	14,15	14,135	14,12	14,14	14,20	14,17	14,145	14,12	14,16	14,16	14,20	14,156	14,13	14,18	14,14	14,16	14,168	14,14	
	600	14,21	14,17	14,17	14,162	14,13	14,18	14,20	14,23	14,175	14,14	14,20	14,18	14,22	14,188	14,16	14,21	14,16	14,17	14,202	14,16	
	700	14,25	14,17	14,23	14,189	14,16	14,19	14,22	14,26	14,204	14,16	14,21	14,22	14,26	14,220	14,19	14,22	14,18	14,19	14,236	14,18	
	800	14,27	14,20	14,26	14,217	14,19	14,20	14,26	14,31	14,234	14,18	14,22	14,24	14,28	14,252	14,22	14,24	14,23	14,22	14,271	14,20	
	900	14,27	14,20	14,28	14,245	14,25	14,21	14,30	14,34	14,264	14,19	14,26	14,26	14,32	14,284	14,23	14,27	14,27	14,26	14,306	14,23	
	1000	14,31	14,26	14,34	14,272	14,27	14,29	14,32	14,38	14,294	14,22	14,29	14,30	14,36	14,317	14,23	14,30	14,32	14,28	14,340	14,27	
18.00	100	18,05	18,08	18,05	18,048	18,04	18,11	18,06	18,07	18,053	18,07	18,06	18,07	18,06	18,057	18,04	18,06	18,05	18,11	18,062	18,04	
	200	18,07	18,14	18,10	18,097	18,08	18,17	18,13	18,16	18,106	18,12	18,12	18,13	18,12	18,115	18,06	18,17	18,10	18,20	18,125	18,07	
	300	18,16	18,18	18,16	18,147	18,15	18,21	18,19	18,21	18,159	18,16	18,17	18,18	18,18	18,173	18,12	18,26	18,16	18,28	18,188	18,14	
	400	18,21	18,25	18,21	18,196	18,21	18,29	18,27	18,25	18,214	18,24	18,24	18,25	18,24	18,232	18,20	18,31	18,24	18,37	18,252	18,22	
	500	18,28	18,30	18,27	18,246	18,26	18,33	18,32	18,33	18,268	18,28	18,30	18,31	18,31	18,292	18,27	18,36	18,30	18,42	18,317	18,30	
	600	18,33	18,33	18,32	18,297	18,31	18,37	18,38	18,38	18,323	18,34	18,36	18,38	18,37	18,352	18,34	18,43	18,37	18,48	18,382	18,35	
	700	18,39	18,36	18,37	18,347	18,39	18,42	18,43	18,44	18,379	18,37	18,40	18,42	18,41	18,412	18,38	18,47	18,46	18,51	18,448	18,39	
	800	18,44	18,41	18,43	18,399	18,46	18,49	18,46	18,50	18,435	18,42	18,46	18,48	18,46	18,474	18,45	18,52	18,54	18,57	18,515	18,50	
	900	18,50	18,43	18,47	18,450	18,48	18,53	18,53	18,55	18,491	18,49	18,52	18,54	18,51	18,535	18,51	18,57	18,61	18,64	18,583	18,53	
	1000	18,56	18,49	18,53	18,502	18,54	18,57	18,62	18,60	18,548	18,55	18,59	18,60	18,56	18,598	18,57	18,64	18,67	18,72	18,651	18,59	
22.00	100	22,11	22,13	22,19	22,089	22,12	22,13	22,14	22,22	22,099	22,15	22,14	22,15	22,25	22,109	22,09	22,12	22,13	22,21	22,120	22,14	
	200	22,25	22,22	22,37	22,180	22,21	22,21	22,27	22,33	22,199	22,23	22,25	22,26	22,46	22,220	22,23	22,25	22,28	22,44	22,243	22,26	
	300	22,40	22,32	22,47	22,273	22,28	22,28	22,40	22,48	22,302	22,28	22,37	22,38	22,57	22,334	22,31	22,37	22,42	22,60	22,369	22,37	
	400	22,46	22,40	22,59	22,366	22,46	22,38	22,54	22,59	22,406	22,41	22,50	22,51	22,68	22,449	22,44	22,49	22,49	22,75	22,498	22,49	
	500	22,55	22,50	22,77	22,461	22,55	22,45	22,69	22,68	22,511	22,50	22,61	22,63	22,90	22,567	22,55	22,58	22,63	22,93	22,629	22,61	
	600	22,68	22,63	22,92	22,558	22,69	22,53	22,78	22,80	22,619	22,60	22,76	22,77	23,04	22,687	22,65	22,76	22,69	23,07	22,764	22,73	
	700	22,76	22,69	23,11	22,656	22,81	22,61	22,93	22,94	22,729	22,72	22,94	22,93	23,26	22,810	22,79	22,97	22,83	23,18	22,902	22,85	
	800	22,86	22,84	23,24	22,755	22,92	22,75	23,05	23,05	22,840	22,86	23,05	23,07	23,42	22,936	22,90	23,08	22,94	23,29	23,044	22,94	
	900	23,00	22,91	23,49	22,856	23,08	22,83	23,17	23,24	22,954	23,00	23,18	23,19	23,60	23,064	23,02	23,17	23,06	23,47	23,189	23,07	
	1000	23,07	23,04	23,63	22,959	23,19	22,92	23,33	23,41	23,070	23,10	23,33	23,34	23,84	23,195	23,15	23,35	23,19	23,69	23,338	23,21	

estão muito próximos dos resultados experimentais levantados no carregamento de amplitude constante, para todas as dimensões de fissura estudadas. Foi observado também a proximidade entre os resultados teóricos e os obtidos pelo segundo e terceiro programa de ensaios, pois como já foi comentado, ocorre uma rápida estabilização da aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga devido a sobrecargas, sendo o fenômeno observado no instante da aplicação do carregamento ascendente.

Para a determinação do modelo teórico que represente o fenômeno de interação resultante de aplicação de sobrecargas, conhecido como aceleração no crescimento da fissura, será empregada a equação de Forman, que como vimos representa bem o carregamento de amplitude constante.

Para melhor compreender o modelo que será apresentado faremos uso da figura 61 indicada a seguir.

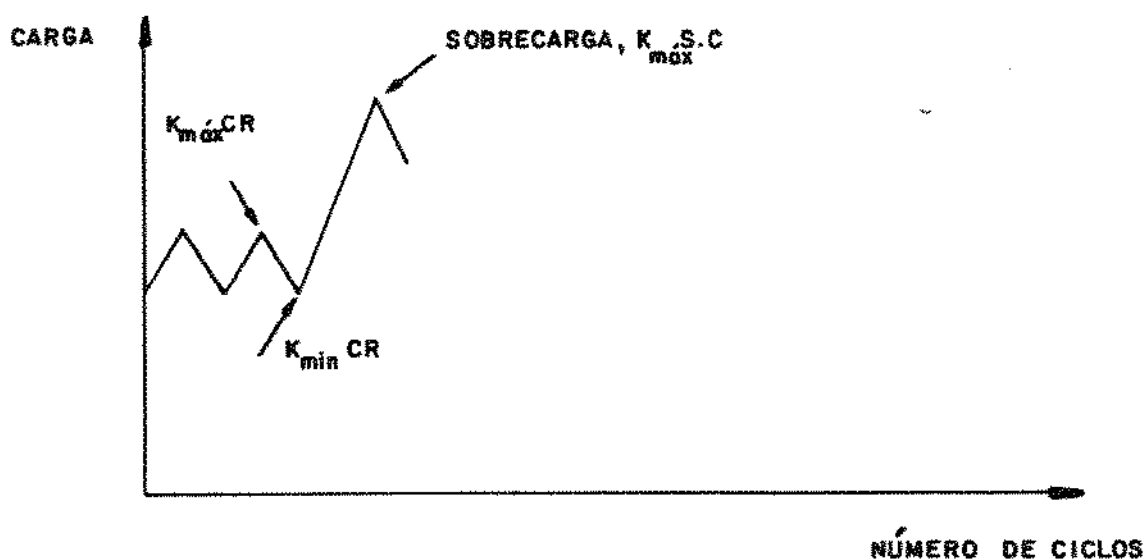


Figura 61 - Sequência de carregamento.

O modelo desenvolvido se baseia no aparecimento de um fator intensidade de tensão acelerado (K acelerado) no instante de aplicação da sobrecarga, responsável por um maior crescimento da trinca no ponto considerado.

Observando a figura 61; podemos verificar que na passagem para o carregamento de maior amplitude estão envolvidos o fator intensidade de tensão mínimo da carga de referência (K<sub>mín</sub> C.R.) e o fator intensidade de tensão máximo na sobrecarga (K<sub>máx</sub> S.C.), de maneira que o K acelerado a ser utilizado na equação de Forman está relacionado com estes dois valores, do seguinte modo:

$$K \text{ acelerado} = K_{\text{máx}} \text{ S.C} - K_{\text{mín}} \text{ C.R.} \quad (24)$$

Assim, a equação de Forman  $\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^n}{(1-R) K_c - \Delta K}$

empregada com muito sucesso no carregamento de amplitude constante será adaptada para representar a aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga e assumirá a seguinte forma:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K \text{ efetivo})^n}{(1-R \text{ efetivo}) K_c - \Delta K \text{ efetivo}} \quad (25)$$

onde:

$$R \text{ efetivo} = \frac{K \text{ mínimo} + K \text{ acelerado}}{K \text{ máximo} + K \text{ acelerado}} \rightarrow R \text{ efetivo} = \frac{K \text{ mínimo efetivo}}{K \text{ máximo efetivo}} \quad (26)$$

e

$$\Delta K \text{ efetivo} = K \text{ máximo efetivo} - K \text{ mínimo efetivo} \quad (27)$$

A atuação da equação de Forman modificada, ou seja, a presença de K acelerado vai ocorrer no instante em que houver um carregamento de seqüência ascendente. Se o espectro de cargas for como o apresentado no segundo e terceiro programa de ensaios, K acelerado vai agir no primeiro ciclo do carregamento de maior amplitude, voltando a seguir, o emprego da equação de Forman para o cálculo do comprimento da trinca no nível mais alto de carga.

Na tabela 12 estão representados os valores das fissuras no primeiro ciclo das sobrecargas, para os vários comprimentos da trinca nos quais ocorre o carregamento de seqüência ascendente, calculados pela equação de Forman e equação de Forman modificada e na tabela 13 estão indicados os valores que representam o quanto a variação no comprimento da trinca no primeiro ciclo da sobrecarga é maior com a utilização do K acelerado do que no carregamento de amplitude constante calculado pela equação de Forman.

Através da tabela 13 podemos verificar que o emprego da equação de Forman modificada leva a taxas de crescimento seguindo o aumento na intensidade de tensão, para quase todos os casos, de duas a quatro vezes maior do que as taxas de crescimento em carregamento de amplitude constante, no nível mais alto. As excessões são para as sobrecargas de  $(7000 \pm 2500)N$ ,  $(7500 \pm 2500)N$  e  $(8000 \pm 2500)N$ , no comprimento da trinca de 22,00mm, que correspondem a pontos próximos ao início da região III da curva  $\frac{da}{dN} \times \log \Delta K$  onde o crescimento da trinca ocorre quase que instavelmente.

Taxas de crescimento da trinca no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga quase quatro vezes maiores do que as

Tabela 12 - Valores do comprimento da trinca no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga.

Compr. Trinca (mm)	Nº de Ciclos	(5000±2500)N+(6500±2500)N		(5000±2500)N+(7000±2500)N		(5000±2500)N+(7500±2500)N		(5000±2500)N+(8000±2500)N	
		Equação de Forman	Equação de Forman Modificada	Equação de Forman	Equação de Forman Modificada	Equação de Forman	Equação de Forman Modificada	Equação de Forman	Equação de Forman Modificada
5,00	1	6,0000680	6,000133	6,0000730	6,000145	6,0000780	6,000157	6,0000820	6,000170
10,00	1	10,000140	10,000300	10,000150	10,000330	10,000160	10,000360	10,000170	10,000400
14,00	1	14,000270	14,000630	14,000290	14,000700	14,000310	14,000790	14,000330	14,000890
18,00	1	18,000490	18,00135	18,000530	18,00158	18,000570	18,00187	18,000620	18,00224
22,00	1	22,000890	22,00349	22,000990	22,00462	22,00109	22,00649	22,00120	22,010130

Esta tabela não tem sentido físico, apenas matemático.

Tabela 13 - Relação entre as variações no comprimento da trinca no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga, através das equações de Forman modificado e equação de Forman.

Compr. Trinca (mm)	Nº Ciclos	(5000±2500)N+(6500±2500)N		(5000±2500)N+(7000±2500)N		(5000±2500)N+(7500±2500)N		(5000±2500)N+(8000±2500)N	
		$\Delta a$ Forman Modificado	$\Delta a$ Forman	$\Delta a$ Forman Modificado	$\Delta a$ Forman	$\Delta a$ Forman Modificado	$\Delta a$ Forman	$\Delta a$ Forman Modificado	$\Delta a$ Forman
6,00	1	1,95		1,99		2,01		2,07	
10,00	1	2,14		2,20		2,25		2,35	
14,00	1	2,33		2,41		2,55		2,70	
18,00	1	2,75		2,98		3,28		3,61	
22,00	1	3,92		4,67		5,95		8,44	



taxas de crescimento em carregamento de amplitude constante no nível mais alto foram observadas por Matthews [38] que verificou também uma estabilização mais rápida da aceleração comparada com os efeitos do retardo.

A rápida estabilização do efeito da aceleração no crescimento da trinca por fadiga, ocorrida nos resultados experimentais do segundo programa de ensaios e representada nas figuras 47 a 50, também pode ser observada na tabela 14.

Deve ser lembrado aqui que a presença do K acelerado na equação de Forman ocorre só no primeiro ciclo de aplicação da sobrecarga, voltando a seguir a ser feito através da equação de Forman o cálculo do comprimento da trinca a partir do segundo ciclo do carregamento de mais alto nível. Fazendo uma análise da tabela 14 lembrando que K acelerado fornece uma variação no comprimento da trinca de duas a quatro vezes a variação determinada pela equação de Forman, podemos verificar que os valores do comprimento da fissura fornecidos pela equação de Forman e pela equação de Forman modificada estão bem próximos, o que confirma a observação experimental da rápida estabilização do efeito da aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga e assim credencia favoravelmente o modelo teórico desenvolvido.

O segundo programa de ensaios realizado com o objetivo de estudar a aceleração no crescimento da trinca por fadiga e sua respectiva estabilização em função do número de ciclos aplicados no carregamento de mais alto nível e o quarto programa de ensaios cuja execução teve como finalidade conhecer o mecanismo da aceleração ao longo de cada ciclo, não representam espectros reais de carregamento aos quais estruturas em serviço estão normalmente solicitadas e por isto mesmo podem não nos

Tabela 14 - Valores do comprimento da trinca fornecidos pela Equação de Forman e Equação de Forman Modificada.

Compr. trinca (mm)	Nº de Ciclos	(5000±2500)N + (6500±2500)N		(5000±2500)N + (7000±2500)N		(5000±2500)N + (7500±2500)N		(5000±2500)N + (8000±2500)N	
		Equação de Forman	Equação de Forman Modificada	Equação de Forman	Equação de Forman Modificada	Equação de Forman	Equação de Forman Modificada	Equação de Forman	Equação de Forman Modificada
6,00	100	6,0068	6,0068	6,0072	6,0073	6,0077	6,0078	6,0081	6,0082
	200	6,0136	6,0136	6,0144	6,0145	6,0154	6,0154	6,0163	6,0164
	300	6,0204	6,0204	6,0217	6,0217	6,0230	6,0231	6,0244	6,0245
	400	6,0272	6,0272	6,0289	6,0290	6,0308	6,0308	6,0326	6,0327
	500	6,0339	6,0340	6,0362	6,0363	6,0385	6,0386	6,0408	6,0409
	600	6,0408	6,0409	6,0435	6,0435	6,0462	6,0463	6,0490	6,0491
	700	6,0477	6,0477	6,0508	6,0508	6,0539	6,0540	6,0572	6,0573
	800	6,0545	6,0546	6,0581	6,0581	6,0617	6,0618	6,0655	6,0656
	900	6,0613	6,0614	6,0654	6,0655	6,0695	6,0696	6,0737	6,0738
	1000	6,0682	6,0683	6,0727	6,0728	6,0773	6,0774	6,0820	6,0820
10,00	100	10,014	10,014	10,015	10,015	10,016	10,016	10,017	10,018
	200	10,029	10,029	10,031	10,031	10,033	10,033	10,035	10,035
	300	10,043	10,043	10,046	10,046	10,049	10,049	10,052	10,053
	400	10,057	10,057	10,061	10,062	10,066	10,066	10,069	10,070
	500	10,072	10,072	10,077	10,077	10,082	10,082	10,087	10,088
	600	10,086	10,086	10,092	10,092	10,099	10,099	10,105	10,105
	700	10,100	10,101	10,108	10,108	10,115	10,115	10,123	10,123
	800	10,115	10,115	10,123	10,124	10,132	10,132	10,141	10,141
	900	10,129	10,129	10,139	10,139	10,149	10,149	10,159	10,159
	1000	10,144	10,144	10,155	10,155	10,165	10,166	10,176	10,177
14,00	100	14,027	14,027	14,029	14,029	14,031	14,031	14,033	14,034
	200	14,054	14,054	14,058	14,058	14,062	14,063	14,067	14,067
	300	14,081	14,081	14,087	14,087	14,093	14,094	14,100	14,101
	400	14,108	14,108	14,116	14,116	14,125	14,125	14,134	14,135
	500	14,135	14,135	14,145	14,146	14,156	14,157	14,168	14,168
	600	14,162	14,162	14,175	14,175	14,188	14,189	14,202	14,203
	700	14,189	14,189	14,204	14,205	14,220	14,220	14,236	14,237
	800	14,217	14,217	14,234	14,235	14,252	14,253	14,271	14,271
	900	14,245	14,245	14,264	14,264	14,284	14,285	14,306	14,306
	1000	14,272	14,273	14,294	14,294	14,317	14,317	14,340	14,341
18,00	100	18,048	18,049	18,053	18,054	18,057	18,059	18,062	18,064
	200	18,097	18,098	18,106	18,107	18,115	18,116	18,125	18,127
	300	18,147	18,148	18,159	18,161	18,173	18,175	18,188	18,190
	400	18,196	18,197	18,214	18,215	18,232	18,234	18,252	18,254
	500	18,246	18,247	18,268	18,269	18,292	18,293	18,317	18,319
	600	18,297	18,298	18,323	18,324	18,352	18,353	18,382	18,384
	700	18,347	18,348	18,379	18,380	18,412	18,414	18,448	18,450
	800	18,399	18,399	18,435	18,436	18,474	18,475	18,515	18,517
	900	18,450	18,451	18,491	18,492	18,535	18,537	18,583	18,585
	1000	18,502	18,503	18,548	18,549	18,598	18,599	18,651	18,653
22,00	100	22,089	22,092	22,099	22,103	22,109	22,115	22,128	22,129
	200	22,180	22,183	22,199	22,203	22,220	22,226	22,243	22,253
	300	22,273	22,275	22,302	22,305	22,334	22,339	22,369	22,379
	400	22,366	22,369	22,406	22,409	22,449	22,455	22,498	22,507
	500	22,461	22,464	22,511	22,515	22,567	22,573	22,629	22,639
	600	22,558	22,560	22,619	22,623	22,687	22,693	22,764	22,774
	700	22,656	22,658	22,729	22,733	22,810	22,816	22,902	22,912
	800	22,755	22,758	22,840	22,844	22,936	22,942	23,044	23,054
	900	22,856	22,859	22,954	22,958	23,064	23,070	23,189	23,199
	1000	22,959	22,962	23,070	23,074	23,195	23,202	23,338	23,349

fornecer uma idéia da importância prática da aceleração na propagação da fissura. Agora, se imaginarmos que componentes estruturais estão submetidos a carregamentos em que muitas sobrecargas em forma de picos ou blocos estão presentes e que os mesmos são responsáveis por uma variação no crescimento da trinca de duas a quatro vezes maior do que seria no carregamento de amplitude constante no mais alto nível de carga, veremos que a existência da aceleração na propagação da trinca afeta significativamente a vida da estrutura de uma maneira não conservativa; isto é, reduzindo-a consideravelmente em serviço. Esta observação reforça a necessidade de se modelar teoricamente este fenômeno de interação e justifica o estudo até aqui desenvolvido.

Passemos agora ao estudo e modelamento do efeito do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga como resultado do carregamento de seqüência descendente.

#### 4.5 RETARDO NA TAXA DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

O retardo no crescimento da fissura, que ocorre em carregamentos de seqüência descendente na passagem da carga alta para a carga baixa, será estudado através do segundo e terceiro programas de ensaio, cujos resultados podem ser encontrados nas figuras 39 a 46 e 52 a 59, respectivamente. O número de ciclos envolvidos em cada um dos blocos, seja na carga baixa ou na carga alta estão, para o segundo programa de ensaios, na tabela 5 e para o terceiro programa de ensaios, na tabela 15, indicada a seguir.

Tabela 15 - Número de ciclos envolvidos em cada um dos blocos no Terceiro Programa de Ensaios.

CARGA	(5000±2500)N + (6500±2500)N		(5000±2500)N + (7000±2500)N		(5000±2500)N + (7500±2500)N		(5000±2500)N + (8000±2500)N	
	10,00	14,00	10,00	14,00	10,00	14,00	10,00	14,00
Comprimento da trinca (mm)	18,00	22,00	18,00	22,00	18,00	22,00	18,00	22,00
6,00 - 8,00	28800	30100	29900	31500	29800	30500	27800	26200
8,00 - 10,00	21500	22500	21600	18500	22200	19800	20300	20100
10,00 - 12,00	13400	12600	12800	12400	12500	14800	10900	12500
12,00 - 14,00	14900	10800	19700	10200	40000	10250	38800	12600
14,00 - 16,00	7100	6900	8400	4950	10000	5000	7950	6620
16,00 - 18,00	6200	9200	6400	12050	6350	20750	5950	55850
18,00 - 20,00	3350	3800	3300	3800	3250	3750	2500	4830
20,00 - 22,00	7800	2400	12100	2900	19200	2640	34400	3100
22,00 - 24,00	2900	1200	3000	1400	3500	1070	2400	1160
24,00 - Ruptura	4800	5740	5910	9080	5190	17570	3860	32470
TOTAL	110750	105240	123110	106780	151990	126130	154860	175430
Nº de ciclos na carga baixa	94000	97140	107010	100430	136240	128060	141460	167650
%	84,9	92,3	86,9	94,0	89,6	95,2	91,4	95,6
Nº de ciclos na carga alta	16750	8100	16100	6350	15750	6070	13400	7780
%	15,1	7,7	13,1	6,0	10,4	4,8	8,6	4,4

4.5.1 Estudo dos parâmetros que atuam na intensidade do retardo na propagação da fissura.

4.5.1 a) Relação  $\frac{K_{\text{máx}} S.C}{K_{\text{máx}} C.r}$

Com relação aos experimentos desenvolvidos no segundo programa de ensaios, cujos resultados estão indicados na tabela 5, fazendo uma análise da mesma podemos observar para cada uma das relações  $\frac{K_{\text{máx}} S.C}{K_{\text{máx}} C.r}$  utilizadas, o número de ciclos de carregamento necessários para percorrer cada um dos blocos, na carga alta e na carga baixa, além do número de ciclos nos mesmos blocos para a carga de referência e sobrecarga em um carregamento de amplitude constante. Podemos observar uma grande semelhança entre os resultados dos corpos de prova ensaiados no mesmo parâmetro  $\frac{K_{\text{máx}} S.C}{K_{\text{máx}} C.r}$ ; nos blocos em que ocorre o carregamento da sequência ascendente, os resultados não estão muito diferentes dos valores obtidos no carregamento de amplitude constante na carga mais alta, uma vez que ocorre uma rápida estabilização do efeito da aceleração na propagação da fissura, como já vimos; porém, nos blocos em que ocorre o retorno da sobrecarga para a carga de referência, os resultados do segundo programa de ensaios estão bem diferentes dos dados obtidos no carregamento de amplitude constante na carga baixa, mostrando um número de ciclos maior necessários para percorrer os blocos comparativamente aos mesmos na carga de referência. Este comportamento se deve ao efeito de interação conhecido como retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga, que, como pode ser verificado na tabela 5, é responsável por uma vida total do espécime maior do que a mesma no carregamento de amplitude constante na carga de referência.

Estas mesmas constatações podem ser feitas na análise da tabela 15 que representa os resultados do terceiro programa de ensaios.

Fazendo uma análise das figuras que representam os resultados do segundo e terceiro programa de ensaios verificamos que a estabilização do retardo no crescimento da trinca não ocorre tão rapidamente quanto a estabilização na aceleração da propagação da fissura e que a mesma está diretamente associada a relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ ; ou seja, o retardo no crescimento da trinca é função direta do valor da sobrecarga.

Ainda estudando o efeito do retardo na taxa de propagação da fissura como resultado de um carregamento alto-baixo, na vida total do componente, analisando comparativamente as tabelas 5 e 15 verificamos que na primeira, que representa os resultados do segundo programa de ensaios, a porcentagem da vida total da amostra passada na carga baixa é de 56,2 e 54,9 para o primeiro e segundo ensaios respectivamente na condição  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  igual a 1,20 enquanto que para a relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  igual a 1,40 os resultados são 83,2 e 85,6. Este resultado confirma a importância da relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  no efeito do retardo no crescimento da trinca e que deve, sem dúvida alguma, ser considerada na elaboração do modelo teórico.

A mesma análise realizada para os resultados do terceiro programa de ensaios mostram que para a condição  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  igual a 1,20 a porcentagem da vida na carga baixa foi de 84,9 para os blocos em 10,00mm, 18,00mm e 92,3 para os blocos em 14,00mm, 22,00mm e para a relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  igual a 1,40, as porcenta

gens são 91,4 e 95,6 para os blocos em 10,00mm, 18,00mm e 14,00mm, 22,00mm, respectivamente.

A conclusão que deve ficar desta análise comparativa é que o retardo na propagação da trinca pode ser extremamente benéfica para um aumento na vida total da estrutura e que o mesmo está diretamente relacionado com o parâmetro  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$ .

Além disso, um maior efeito do retardo no crescimento da fissura pode ser observado em programas de ensaio que tenham um maior número de seqüências de carregamento alto-baixo, como é o caso do segundo programa de ensaios.

O retardo no crescimento da trinca pode ser observado de uma maneira mais clara nas figuras 62 a 69 que representam alguns resultados do segundo programa de ensaios.

Fazendo ainda alguns comentários com relação à importância prática do retardo no crescimento da fissura como função do retorno de sobrecargas à carga de referência, na vida útil de um componente submetido a um carregamento de amplitude variável, vamos analisar a tabela 16 representada a seguir.

Na tabela 16 podemos observar para as relações  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40, alguns resultados para o segundo e terceiro programa de ensaios relativos à importância do valor da sobrecarga e da influência do tipo de carregamento a que o componente está submetido, na vida total da amostra. Assim, analisando o quociente vida total/ vida na carga de referência, verificamos para  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$  igual a 1,20, valores de 1,28, 1,26 para o primeiro e segundo ensaios respectivamente, no segundo programa de ensaios e 1,15, 1,10 para blocos em 10,00mm 18,00mm e 14,00mm e 22,00mm no terceiro programa de ensaios.

Tabela 16 - Relações entre os números de ciclos nos vários blocos do segundo e terceiro programa de ensaios.

	(5000 ± 2500)N + (6500 ± 2500)N				(5000 ± 2500)N	(6500 ± 2500)N	(5000 ± 2500)N + (7000 ± 2500)N				(5000 ± 2500)N	(7000 ± 2500)N
	1ª Ensaio	2ª Ensaio	Blocos				1ª Ensaio	2ª Ensaio	Blocos			
			10,00	14,00					10,00	14,00		
Vida Total	123140	121500	110750	105240	95997	88100	154130	138280	123110	106780	95997	90120
<u>Vida Total</u> Vida carga refe- rência	1,28	1,26	1,15	1,10	1,00	0,92	1,60	1,44	1,28	1,11	1,00	0,94
	(5000 ± 2500)N + (7500 ± 2500)N				(5000 ± 2500)N	(7500 ± 2500)N	(5000 ± 2500)N + (8000 ± 2500)N				(5000 ± 2500)N	(8000 ± 2500)N
	1ª Ensaio	2ª Ensaio	Blocos				1ª Ensaio	2ª Ensaio	Blocos			
			10,00	14,00					10,00	14,00		
Vida Total	156510	190450	151990	126130	95997	51370	304170	314880	154860	175430	95997	64307
<u>Vida Total</u> Vida carga refe- rência	1,63	1,98	1,58	1,31	1,00	0,95	3,17	3,28	1,61	1,83	1,00	0,67



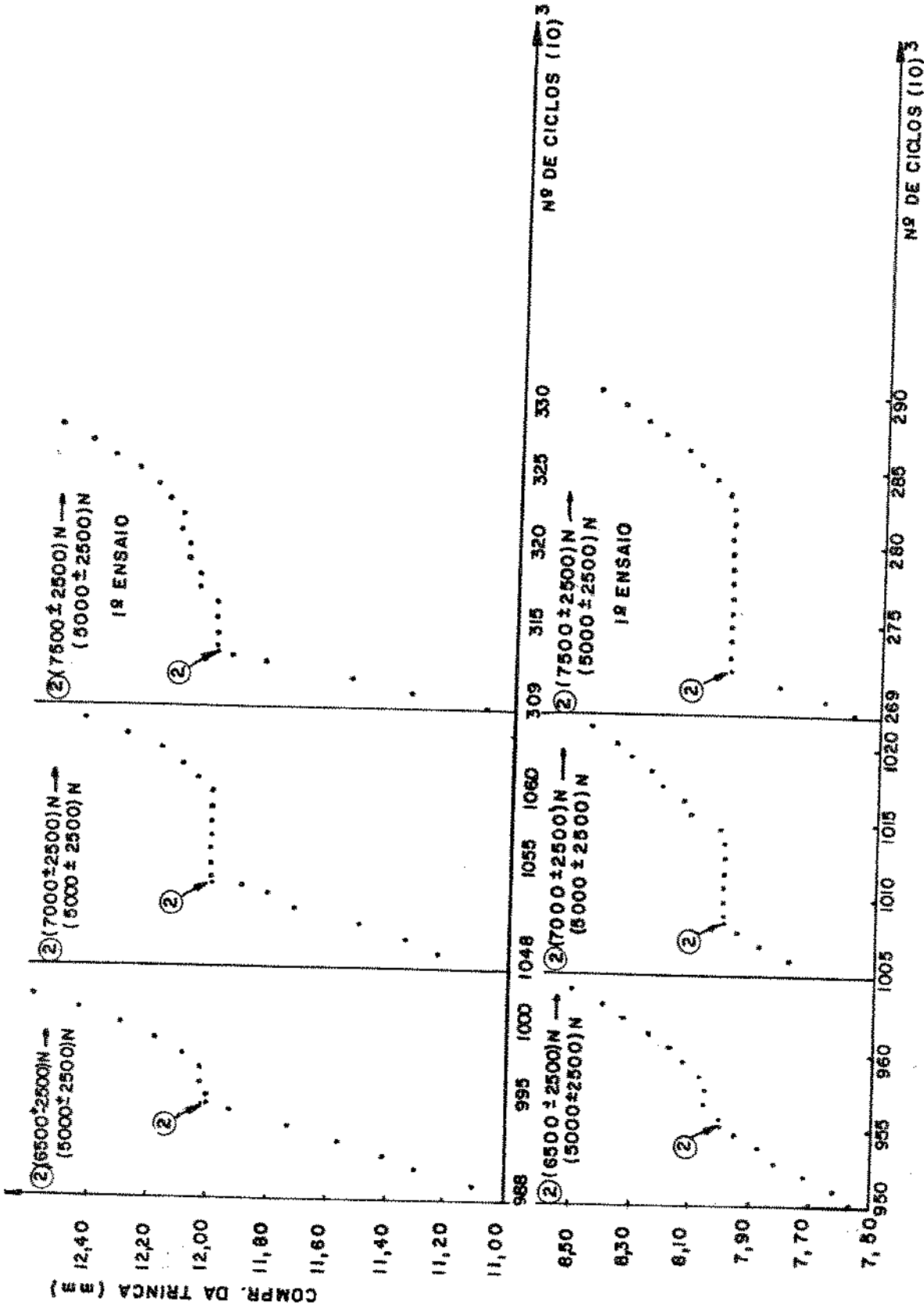


Figura 62 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 8,00mm e 12,00mm.

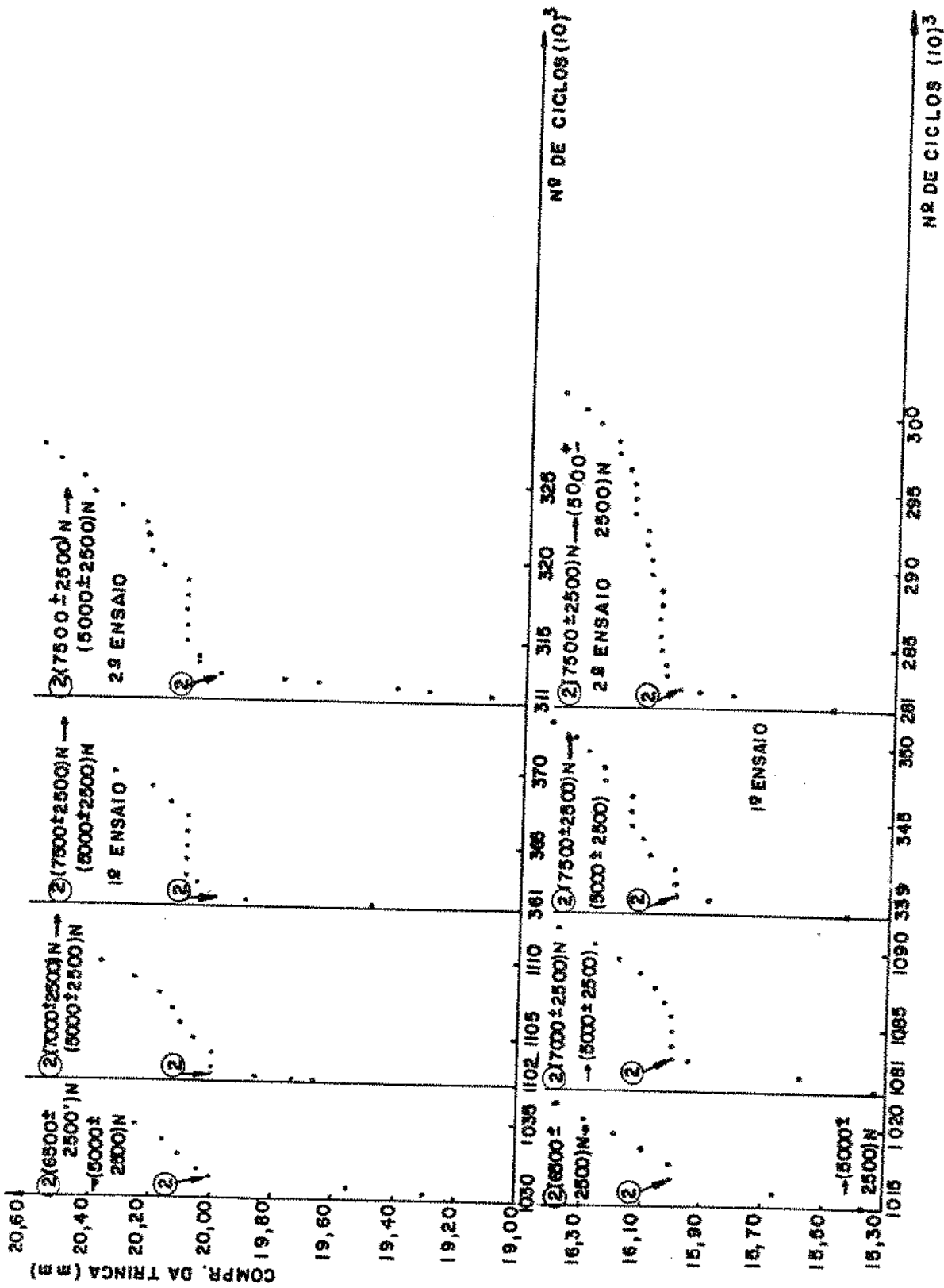


Figura 63 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimento da trinca de 16,00mm e 20,00mm.

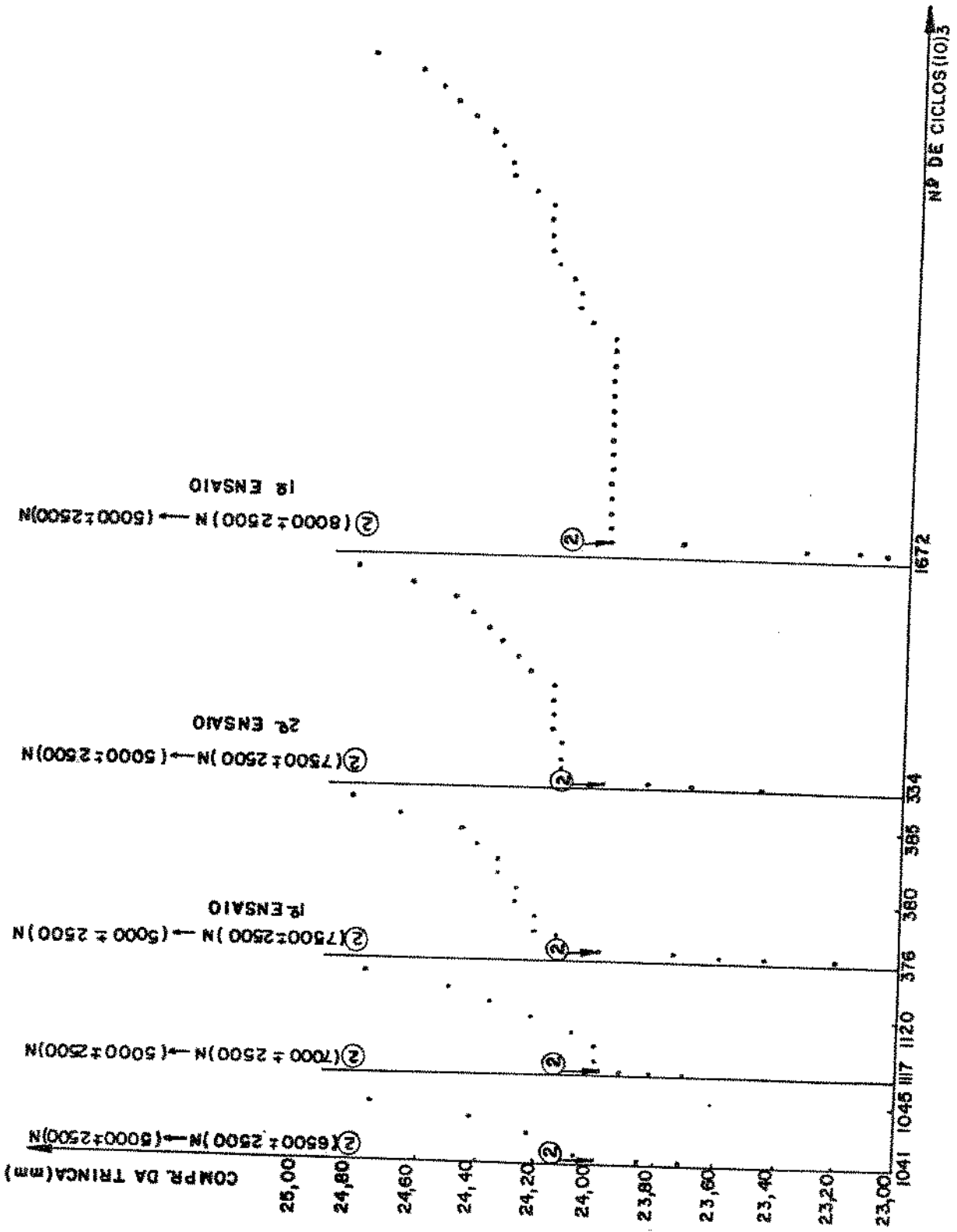


Figura 64 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimento da trinca de 24,00mm.

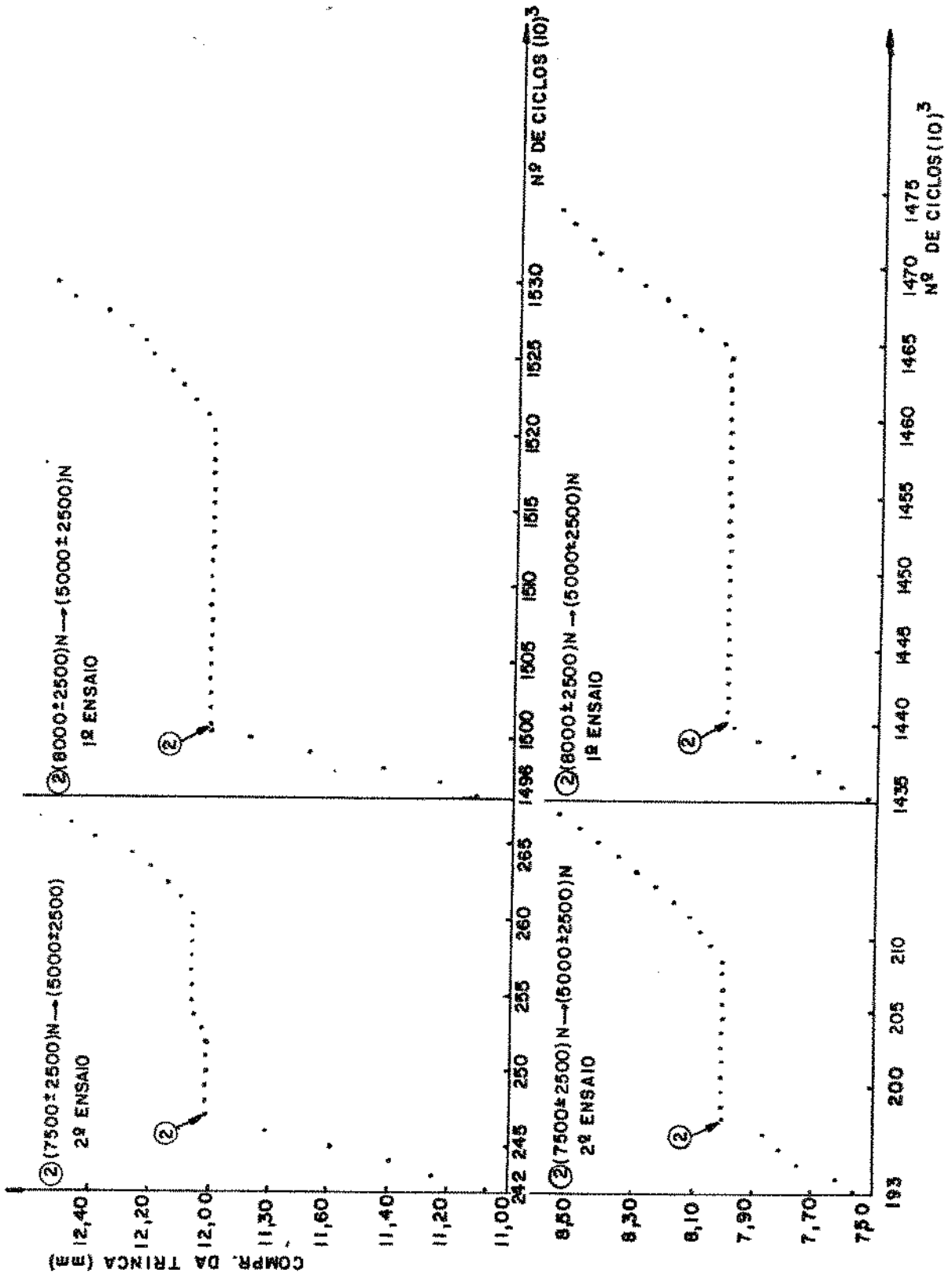


Figura 65 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 8,00mm e 12,00mm.

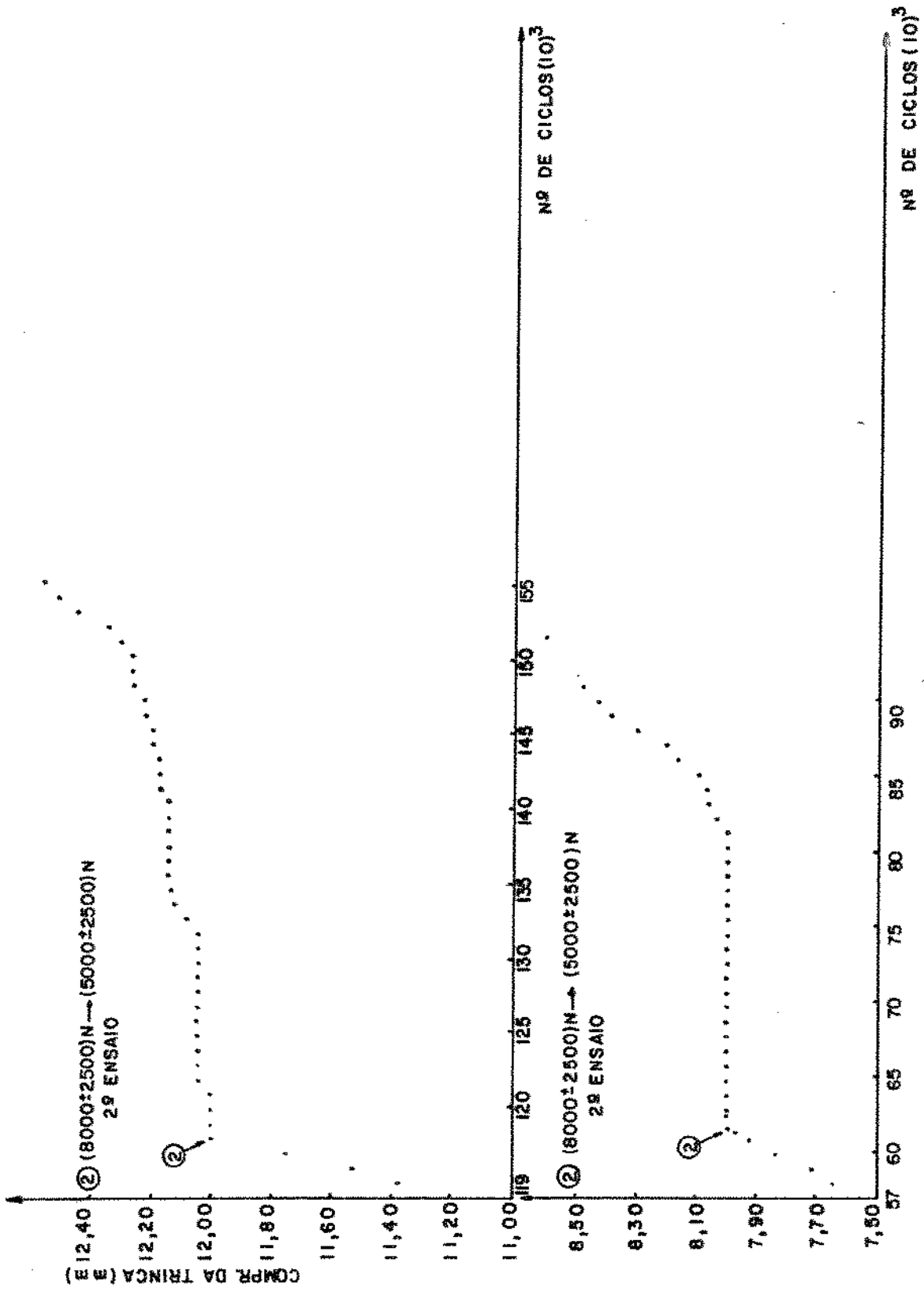


Figura 66 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 8,00mm e 12,00mm.

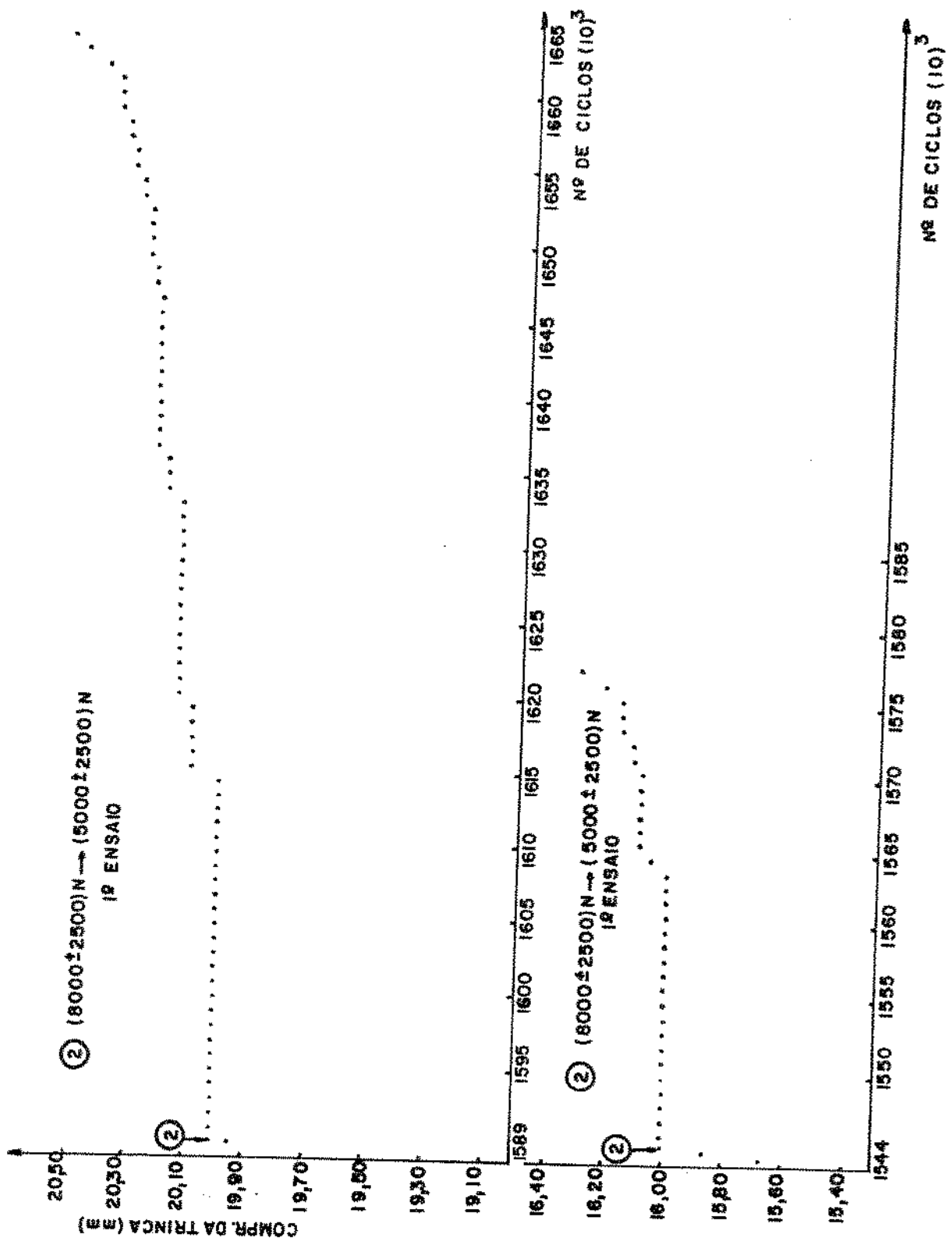


Figura 67 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 16,00mm e 20,00mm.

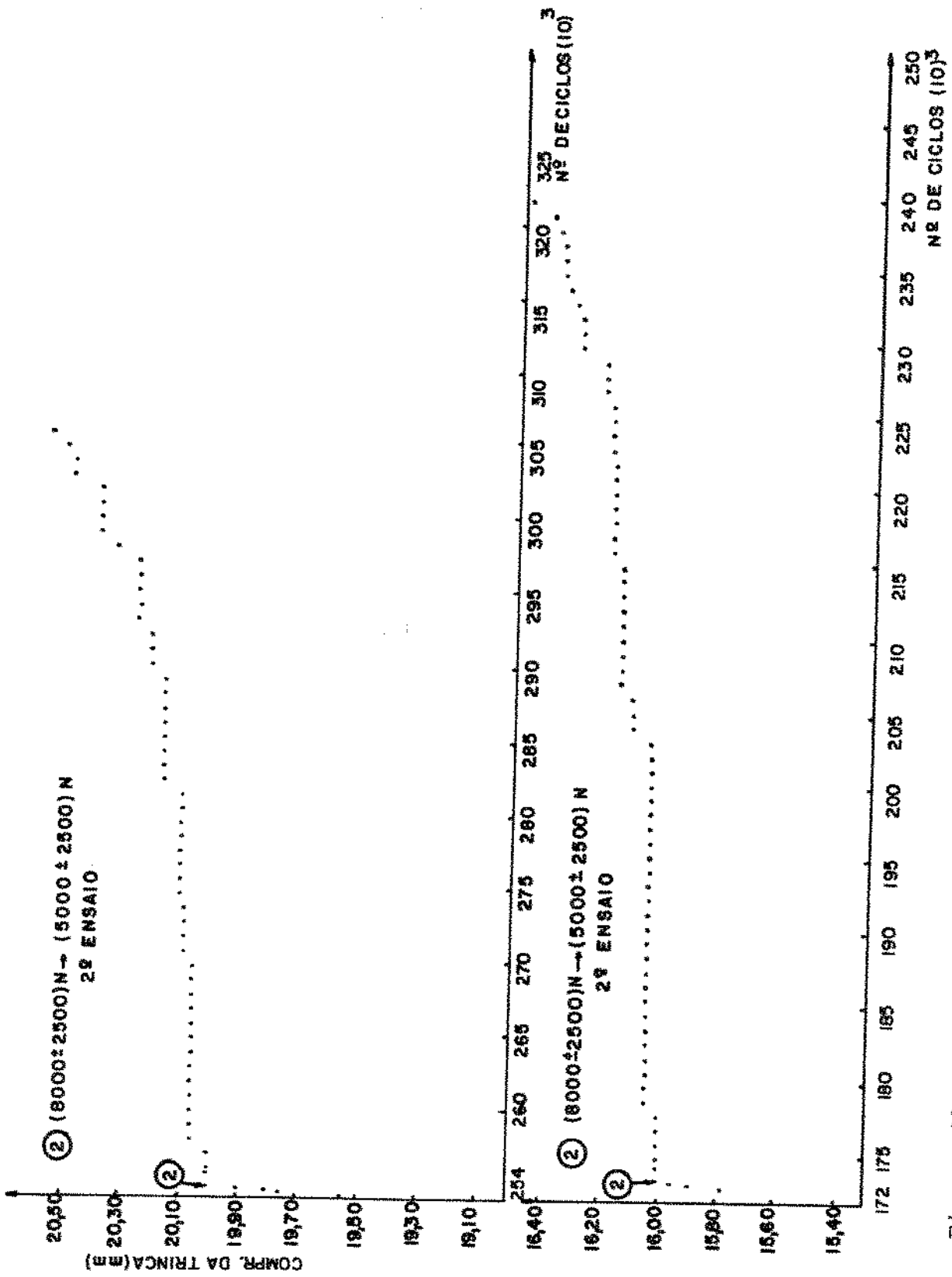


Figura 68 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimentos da trinca de 16,00mm e 20,00mm.

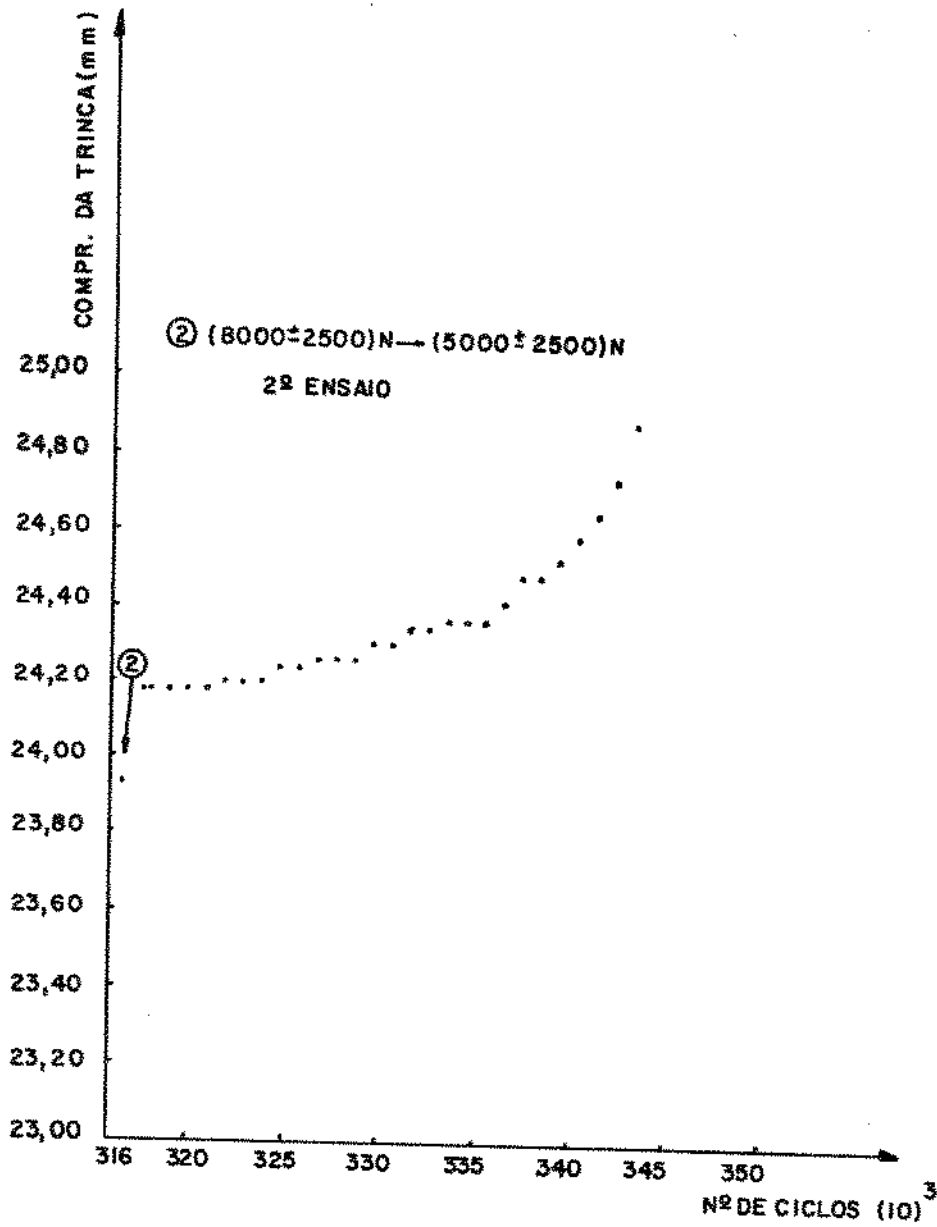


Figura 69 - Resultados do segundo programa de ensaios. Comprimen  
to da trinca de 24,00mm.



Para a relação  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$  igual a 1,40, estes valores são, respectivamente, 3,17, 3,28 e 1,61, 1,83, indicando um aumento substancial na vida total do corpo de prova, em torno de 3 vezes o valor obtido no carregamento de amplitude constante na carga de referência, no segundo programa de ensaios e um aumento menor para o terceiro programa de ensaios, mostrando, portanto, a importância do valor da sobrecarga (através da relação  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$ ) e do espectro de carregamento a que o espécime está submetido.

#### 4.5.1. b) Número de ciclos na carga alta

Nas figuras 70 a 73, representadas a seguir, podemos observar o crescimento da trinca em função do número de ciclos após a passagem do carregamento alto para o baixo, ou seja, dentro da zona plástica criada na ponta da trinca, para as relações  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40.

Até agora, no estudo do efeito do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga como resultado de um carregamento de seqüência descendente, só fizemos alguns comentários com relação a influência de duas variáveis: a relação  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$  e o programa de carregamento a que a amostra está submetida. Verificamos que ambas são fundamentais na determinação do grau de importância do retardo no crescimento da fissura na vida do componente. Entretanto, se analisarmos o segundo e terceiro programas de ensaio idealizados com o objetivo de se estudar também o efeito do retardo na propagação da trinca, veremos que a atuação de um outro parâmetro está embutida nos resultados e portanto deve ser conhecida. Observando as tabelas 5 e 15 podemos ve

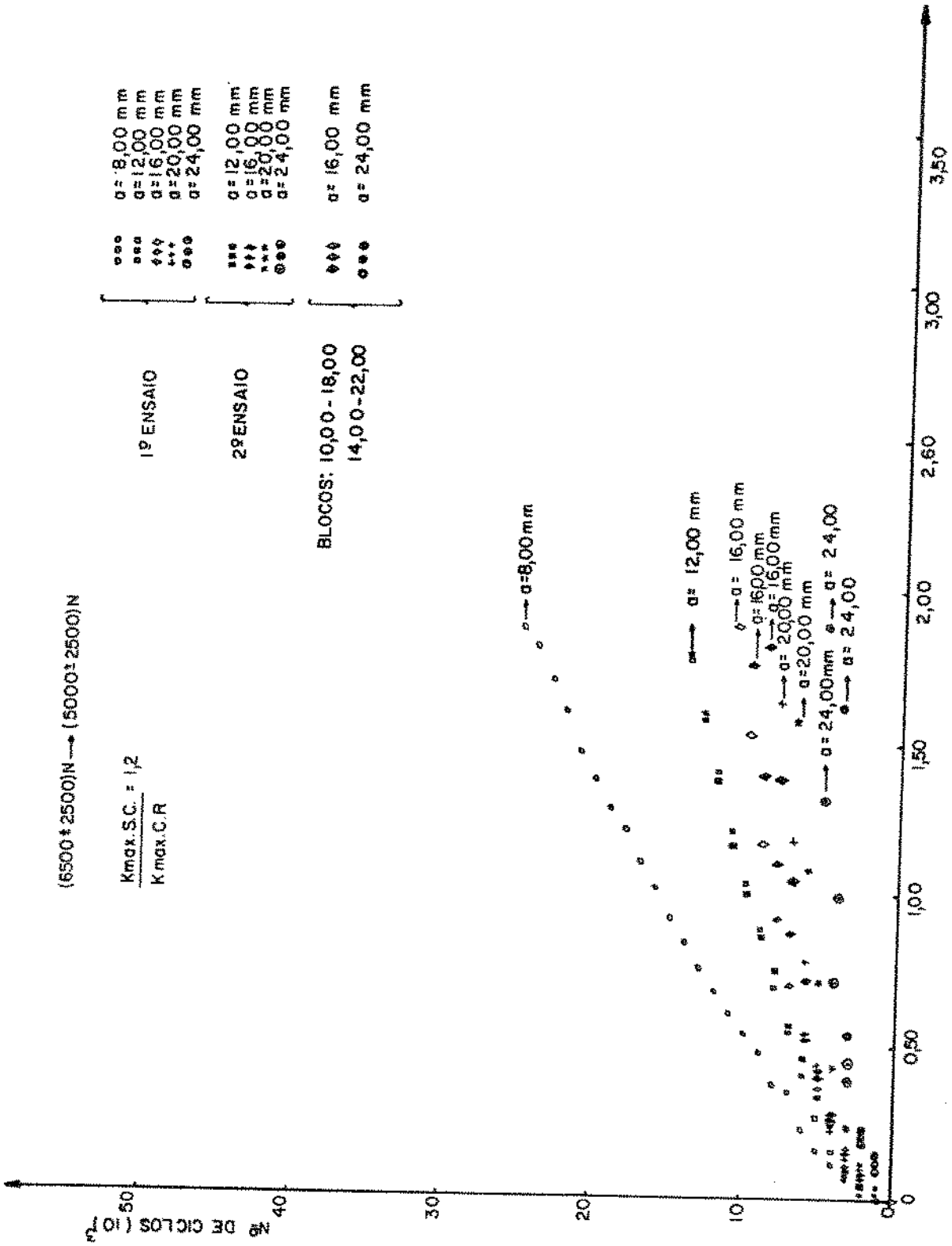


Figura 70 - Comprimento da trinca versus número de ciclos para a relação

$$\frac{K_{\max} S.C. = 1,20}{K_{\max} C.I.}$$

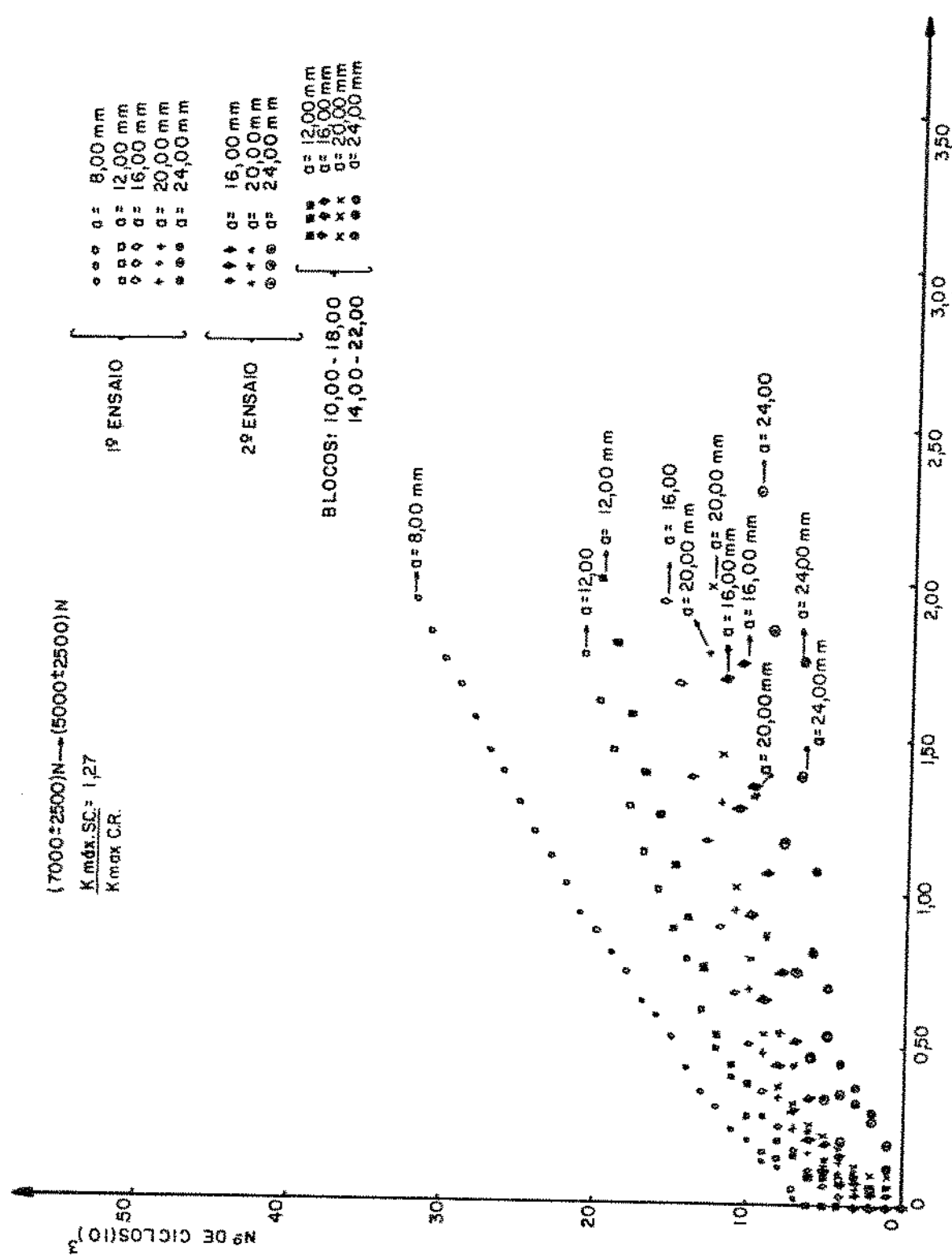


Figura 71 - Comprimento da trinca versus número de ciclos para a relação

$$\frac{K_{m\acute{a}x} S.C.}{K_{m\acute{a}x} C.R.} = 1,27$$

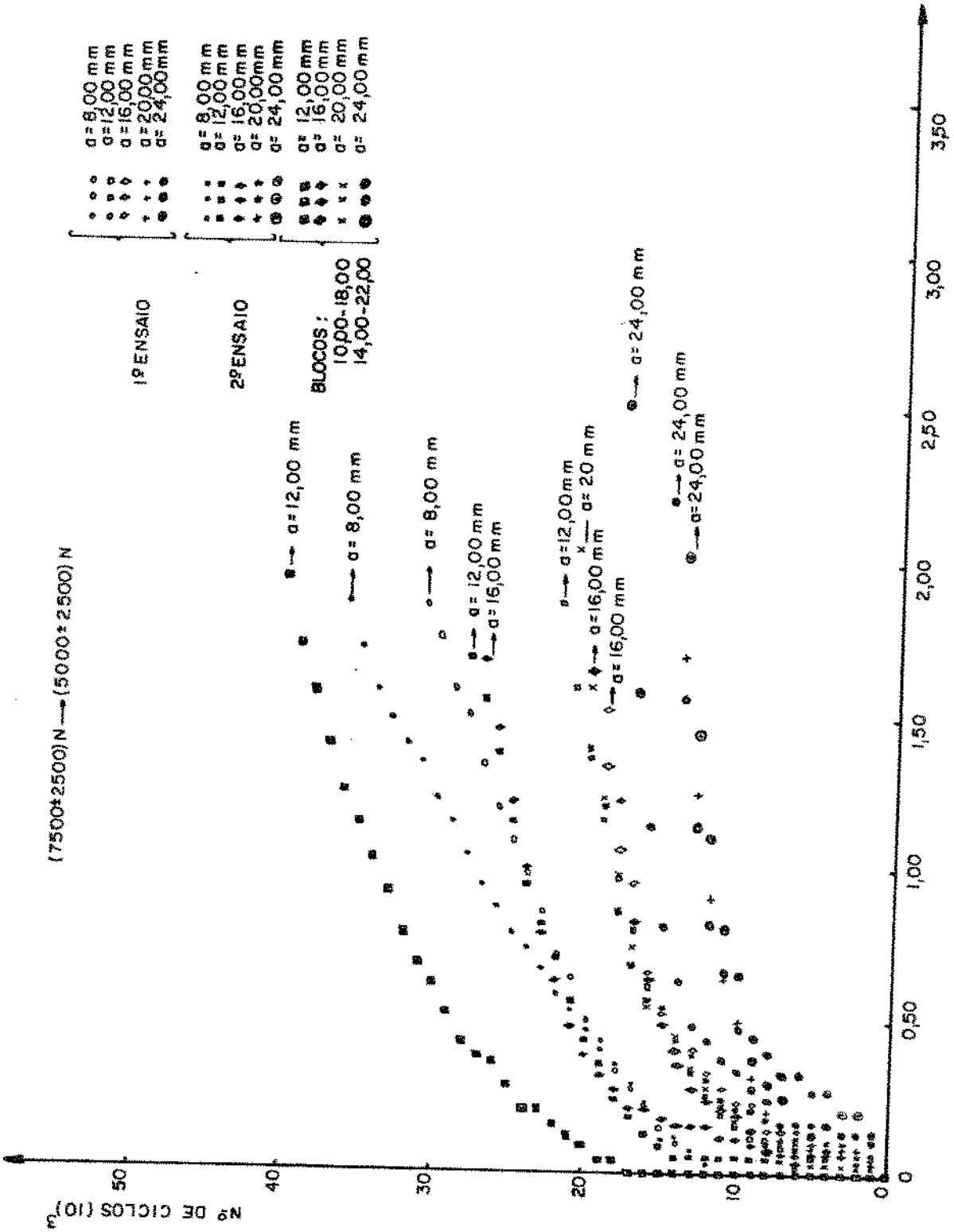


Figura 72 - Comprimento da trinca versus número de ciclos para a relação  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.C}{K_{m\acute{a}x} C.F} = 1,33$

$$\frac{K_{m\acute{a}x} S.C}{K_{m\acute{a}x} C.F} = 1,33$$



rificar para os diversos valores da relação  $\frac{K_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ S.c}}{K_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ C.r}}$  estudados, um n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos diferentes na carga alta para os v $\acute{\text{a}}$ rios blocos aplicados ao esp $\acute{\text{e}}$ cime. Assim, para o mesmo quociente  $\frac{K_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ S.c}}{K_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ C.r}}$ , s $\acute{\text{a}}$ o necess $\acute{\text{a}}$ rios um determinado n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos na carga alta, por exemplo, para percorrer o bloco compreendido entre os comprimentos da trinca de 6,00mm e 8,00mm, com um subsequente n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos na carga de refer $\hat{\text{e}}$ ncia para percorrer o bloco entre os comprimentos de trinca de 8,00mm a 10,00mm. Neste ponto ocorre novamente a seq $\ddot{\text{u}}$ encia ascendente de carregamento com um n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos na carga alta para atravessar o intervalo compreendido entre os comprimentos da trinca de 10,00mm a 12,00mm (devendo lembrar que estes n $\acute{\text{u}}$ meros de ciclos na carga alta s $\acute{\text{a}}$ o diferentes daqueles necess $\acute{\text{a}}$ rios para atravessar o espa $\text{c}$ o entre os comprimentos de trinca de 6,00mm e 8,00mm) quando ent $\acute{\text{a}}$ o ocorre o retorno  $\grave{\text{a}}$  carga de refer $\hat{\text{e}}$ ncia com um determinado n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos necess $\acute{\text{a}}$ rios para atravessar o bloco seguinte, diferentes do n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos necess $\acute{\text{a}}$ rio para percorrer os 2,00mm compreendidos entre os comprimentos de trinca de 8,00 mm e 10,00mm.

Este comportamento ocorre ao longo dos programas de ensaio executados, para todas as amostras, como pode ser observado nas tabelas 5 e 15, indicando a exist $\hat{\text{e}}$ ncia do efeito do n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos na carga alta no comportamento do retardo na propaga $\tilde{\text{c}}\tilde{\text{a}}$ o da fissura.

Fazendo uma primeira an $\acute{\text{a}}$ lise das tabelas 5 e 15, para as rela $\tilde{\text{c}}\tilde{\text{a}}$ o $\tilde{\text{e}}$ s  $\frac{K_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ S.c}}{K_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ C.r}}$  iguais a 1,20 e 1,27 verificamos que h $\acute{\text{a}}$  uma tend $\hat{\text{e}}$ ncia de se aumentar o n $\acute{\text{u}}$ mero de ciclos necess $\acute{\text{a}}$ rios para percorrer os blocos na carga baixa, na seq $\ddot{\text{u}}$ encia descendente

de carregamento à medida que se aumenta o número de ciclos na carga alta. Esta observação também pode ser feita fazendo um estudo das figuras 70 e 71, sendo esta constatação feita por uma série de trabalhos encontrados na literatura especializada. No entanto, para as relações  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  iguais a 1,33 e 1,40 alguns resultados indicam um comportamento diferente daquele observado anteriormente; ou seja, conduzem à possível existência de um número de ciclos ideal na carga alta que propiciam um máximo em termos de ganho no retardo do crescimento da trinca e que nós denominaremos a partir de agora de "número de ciclos de saturação". Esta afirmação pode ser constatada através das tabelas 5 e 15 e principalmente das figuras 72 e 73.

Para a confirmação desta hipótese e determinação do provável número de ciclos de saturação que se torna um parâmetro de projeto extremamente importante para o material empregado no desenvolvimento experimental do trabalho, utilizamos o conceito de número de ciclos de retardo, ND, amplamente aceito e usado nos trabalhos de pesquisa envolvendo picos e blocos de sobrecarga, representado na figura 74.

O número de ciclos de retardo, ND, calculados segundo a definição apresentada na figura estão apresentados na figura 75 em função do número de ciclos na carga alta.

Na figura 75 estão indicados o número de ciclos de retardo versus o número de ciclos na carga alta para os resultados obtidos no segundo e terceiro programa de ensaios. Um comportamento muito interessante pode ser observado, confirmando a existência de um número de ciclos de saturação,  $N_s$ , na carga alta, até o qual há um aumento do número de ciclos de retardo, ND; ou seja, a estrutura na qual a trinca está presente ganha em

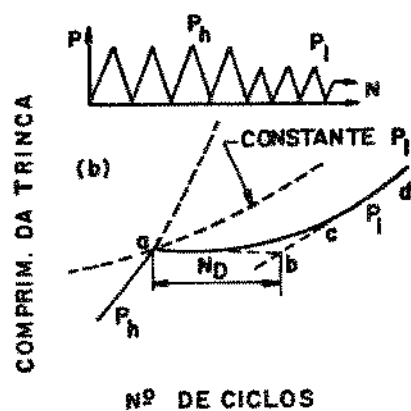
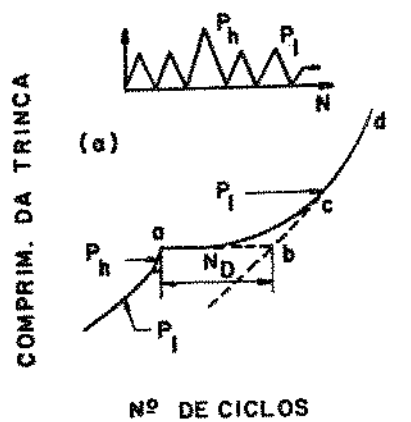


Figura 74 - Conceito de número de ciclos de retardo,  $N_D$ , envolvendo picos e blocos de sobrecarga.



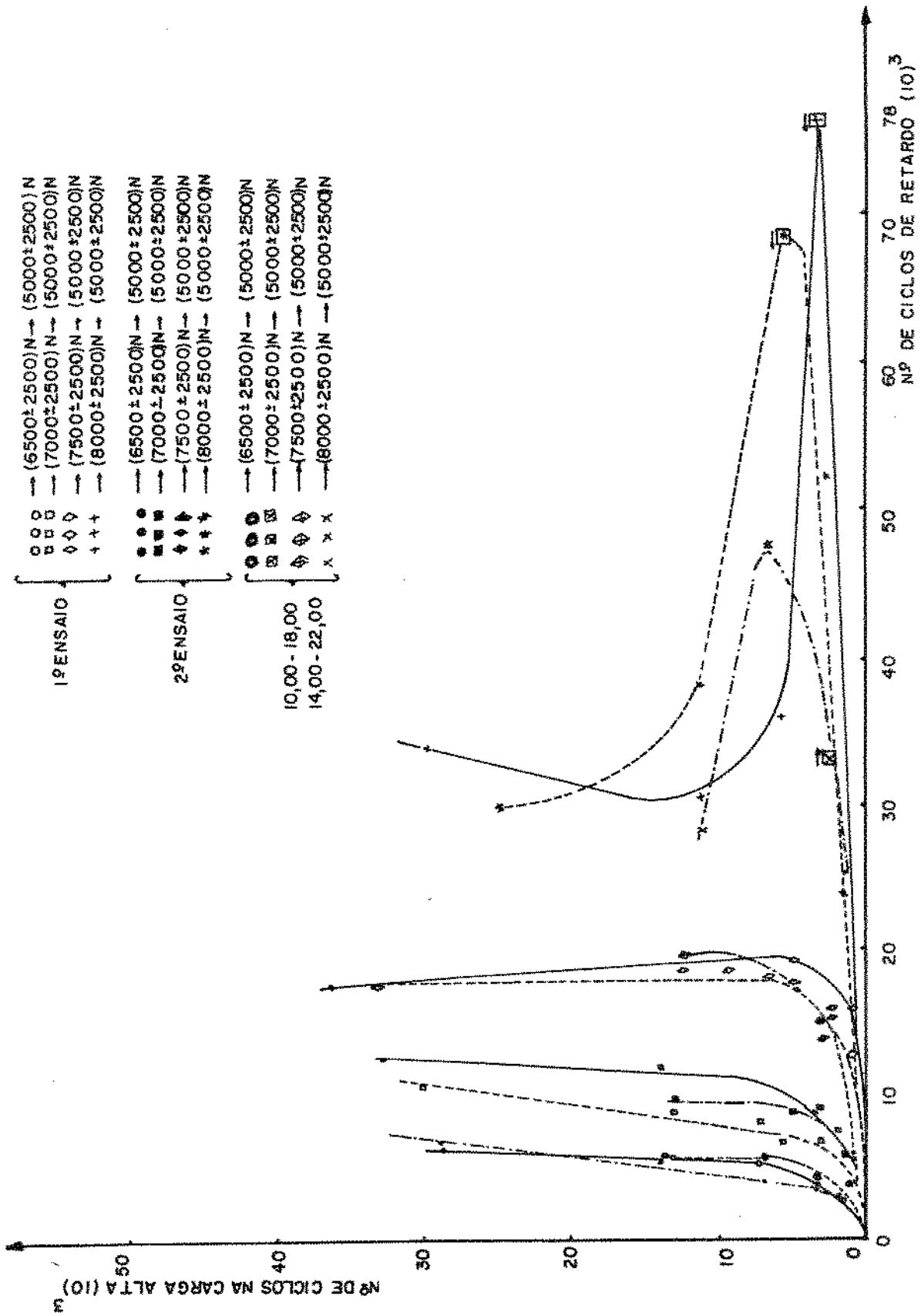


Figura 75 - Representação do número de ciclos de retardo em função do número de ciclos na carga alta.

termos de vida útil. Aplicando um número de ciclos na carga alta maior do que o número de ciclos de saturação, o acréscimo no número de ciclos de retardo é muito pequeno e em alguns casos inclusive inexistente, não devendo esquecer no entanto que um maior número de ciclos na carga alta implica numa maior taxa de crescimento da trinca,  $\frac{da}{dN}$ , o que reduz a vida do componente. Assim, conhecendo o número de ciclos de saturação de um material é possível idealizar um programa de carregamento através do qual podemos usufruir de todos os benefícios deste parâmetro de projeto no que diz respeito a um aumento na vida da amostra em função de um número de ciclos de retardo máximo.

Continuando a análise da figura 75 verificamos uma coerência muito grande para quase todos os resultados do segundo e terceiro programa de ensaios o que nos leva, sem dúvida alguma, a aceitar a existência de um número de ciclos de saturação até onde ocorre uma resposta positiva do número de ciclos de retardo. Para confirmar a semelhança entre os resultados apresentados na figura 75, será fornecida a seguir a tabela 17 na qual estão indicados os quocientes entre o número de ciclos na carga alta e o número de ciclos na carga de referência além do número de ciclos na carga alta e na carga de referência.

Os resultados apresentados na tabela 17 para o segundo e terceiro programas de ensaios nas relações  $\frac{K_{\text{máx S.c}}}{K_{\text{máx C.r}}}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40, são muito próximos indicando uma confiabilidade muito grande nos dados representados na figura 75. Para a relação  $\frac{K_{\text{máx S.c}}}{K_{\text{máx C.r}}}$  igual a 1,40 alguns resultados, marcados com um asterisco na tabela 17, estão um pouco fora do comportamento geral apresentado, sendo uma possível alteração de seu posicionamento feita através de uma seta na figura 75.

Tabela 17 - Relação entre o número de ciclos na carga alta e o número de ciclos na carga de referência.

Compr. da Trinca (mm)	(5000±2500)N + (6500±2500)N						(5000±2500)N + (7000±2500)N						(5000±2500)N + (7500±2500)N						(5000±2500)N + (8000±2500)N							
	Número de ciclos carga alta			Número de ciclos carga ref.			Número de ciclos carga alta			Número de ciclos carga ref.			Número de ciclos carga alta			Número de ciclos carga ref.			Número de ciclos carga alta			Número de ciclos carga ref.				
	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos	1º	2º	Blocos		
	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00	Ensaio	Ensaio	10,00-18,00 14,00-22,00		
6,00-8,00	28500	28700	-	1,10	1,13	-	1,04	0,96	-	1,15	0,90	-	0,60	0,54	-	29700	24600	-	0,60	0,54	-	29700	24600	-	0,60	0,54
8,00-10,00	25900	25300		31400	30900		31400	30900		31300	36450		31400	30900		49400	45300		49400	45300		49400	45300		49400	45300
10,00-12,00	13100	13860	13400	0,86	0,95	0,90	13800	13100	12800	0,62	0,58	0,55	0,62	0,58	0,55	22140	22500	19700	22140	22500	19700	22140	22500	19700	22140	22500
12,00-14,00	15300	14600	14900	15300	14600	14900	7210	5700	4950	0,45	0,49	0,41	0,45	0,49	0,41	7210	5700	4950	7210	5700	4950	7210	5700	4950	7210	5700
14,00-16,00	7200	6860	6900	0,65	0,64	0,75	3500	3100	3300	0,27	0,30	0,27	0,27	0,30	0,27	3500	3100	3300	3500	3100	3300	3500	3100	3300	3500	3100
16,00-18,00	11100	10740	9200	11100	10740	9200	15850	11600	12050	15850	11600	12050	15850	11600	12050	15850	11600	12050	15850	11600	12050	15850	11600	12050	15850	11600
18,00-20,00	3400	3500	3350	0,42	0,47	0,43	2950	2950	3250	0,036	0,042	0,036	0,036	0,042	0,036	2950	2950	3250	2950	2950	3250	2950	2950	3250	2950	2950
20,00-22,00	8000	7460	7800	1700	1840	1200	12800	10350	12100	12800	10350	12100	12800	10350	12100	14050	20200	19200	14050	20200	19200	14050	20200	19200	14050	20200
22,00-24,00	8940	8640	5740	0,19	0,21	0,21	2050	1400	1400	0,16	0,14	0,15	0,16	0,14	0,15	1150	1430	1070	1150	1430	1070	1150	1430	1070	1150	1430
24,00-Rep.	8940	8640	5740	8940	8640	5740	12780	9830	9080	12780	9830	9080	12780	9830	9080	15860	21070	17570	15860	21070	17570	15860	21070	17570	15860	21070
																41570	35230	32470	41570	35230	32470	41570	35230	32470	41570	35230

Estes resultados que fogem de um comportamento padrão esperado são facilmente aceitos se lembrarmos que no trabalho em questão estão sendo estudados única e exclusivamente os fatores mecânicos envolvidos nos efeitos de interação existentes em carregamentos de amplitude não constante, não estão sendo feitas considerações com relação às variações no material estudado. Assim, analisando novamente a tabela 17 e a figura 75 podemos afirmar que, com exceção de alguns poucos pontos, os resultados são extremamente bons, mostrando a existência de um número de ciclos de saturação na carga alta entre 4000 e 8000 ciclos.

Uma vez constatado a existência do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de sequência descendente e conhecidas as influências das variáveis  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$ , espectro de carregamento e número de ciclos na carga alta no efeito do retardo e na sua respectiva influência na vida residual da amostra, resta-nos obter um modelo teórico que represente este retardo no crescimento da trinca, o que será feito a seguir.

#### 4.5.2. Modelo para o Retardo na Taxa de Propagação da Trinca por Fadiga

Para a obtenção do modelo teórico que represente o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga, empregamos o modelo de Willenborg, que foi explicado em detalhes na introdução teórica do trabalho.

A opção pelo modelo de Willenborg se deve a algumas razões. Em primeiro lugar, o total de retardo no crescimento da trinca para um dado ciclo aplicado depende do nível de carga

mento ao qual a amostra está submetida, como pode ser verificado, por exemplo, nas figuras 62 a 69, bem como da extensão do crescimento da fissura dentro da zona plástica criada pela sobrecarga, como pode ser observado nas figuras 70 a 73. Estudando o modelo de Willenborg, verificamos que o mesmo se baseia exatamente nestes dois fatores observados experimentalmente; ou seja, a sua conceituação física é correta. Em segundo lugar, o mesmo modelo emprega a equação de Forman para a determinação de  $\frac{da}{dN}$ , que como vimos representa bem, para os resultados experimentais obtidos no trabalho, o comportamento do carregamento sob amplitude constante.

#### 4.5.2.1 Restrições do Modelo de Willenborg

A primeira etapa na determinação do modelo teórico foi obter, através do modelo de Willenborg, os comprimentos da trinca nos carregamentos de seqüência descendente para as relações  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40.

Os resultados podem ser observados na tabela 18, que contém para o segundo e terceiro programas de ensaio, para as relações  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40 os resultados experimentais e os valores obtidos através da utilização do modelo de Willenborg.

Uma primeira conclusão que pode ser tirada através da análise dos dados contidos na tabela 18, para todos os pontos em que ocorreu o carregamento de seqüência descendente nos diversos quocientes  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$  é o rápido crescimento da trinca dentro da zona plástica criada pela sobrecarga fornecido pelo

Tabela 18 - Comprimentos da trinca. Resultados obtidos experimentalmente e através do modelo de Willenborg.

Compr. Trinca (mm)	nº de Ciclos	(5000 ± 2500)N → (6500 ± 2500)N						(5000 ± 2500)N → (7000 ± 2500)N						
		2º Programa		2º Programa		3º Programa		2º Programa		2º Programa		3º Programa		
		1º Ensaio		2º Ensaio		Bl. (10,00-18,00) (14,00-22,00)		1º Ensaio		2º Ensaio		Bl. (10,00-18,00) (14,00-22,00)		
		Compr. Trinca	a 1 Experimental	Compr. Trinca	a 2 Experimental	Compr. Trinca	a 3 Experimental	Compr. Trinca	a 1 Experimental	Compr. Trinca	a 2 Experimental	Compr. Trinca	a 3 Experimental	
8,00	1	8,000	8,000	8,000	8,000	-	-	8,000	8,000	8,000	8,000	-	-	
	100	8,006	8,000	8,006	8,000	-	-	8,006	8,000	8,006	8,000	-	-	
	200	8,013	8,000	8,013	8,000	-	-	8,011	8,000	8,011	8,000	-	-	
	300	8,019	8,000	8,019	8,000	-	-	8,017	8,000	8,017	8,000	-	-	
	400	8,026	8,000	8,026	8,000	-	-	8,023	8,000	8,023	8,000	-	-	
	500	8,032	8,000	8,032	8,000	-	-	8,029	8,000	8,029	8,000	-	-	
	1000	8,067	8,000	8,067	8,000	-	-	8,061	8,000	8,061	8,000	-	-	
	1500	8,105	8,050	8,105	8,050	-	-	8,095	8,000	8,095	8,000	-	-	
	2000	-	-	-	-	-	-	8,131	8,000	8,131	8,000	-	-	
	2500	-	-	-	-	-	-	8,171	8,000	8,171	8,000	-	-	
12,00	1	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	
	100	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	
	200	12,02	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	
	300	12,04	12,00	12,04	12,00	12,04	12,00	12,03	12,00	12,03	12,00	12,03	12,00	
	400	12,05	12,00	12,05	12,00	12,05	12,00	12,04	12,00	12,04	12,00	12,04	12,00	
	500	12,06	12,00	12,06	12,00	12,06	12,00	12,06	12,00	12,06	12,00	12,06	12,00	
	1000	12,13	12,00	12,13	12,00	12,13	12,00	12,12	12,00	12,12	12,00	12,12	12,00	
	1500	12,20	12,02	12,20	12,05	12,20	12,02	12,18	12,00	12,18	12,00	12,18	12,00	
	2000	-	-	-	-	-	-	12,25	12,00	12,25	12,00	12,25	12,00	
	16,00	1	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
100		16,02	16,00	16,02	16,00	16,02	16,00	16,02	16,00	16,02	16,00	16,02	16,00	
200		16,04	16,00	16,04	16,00	16,04	16,00	16,04	16,00	16,04	16,00	16,04	16,00	
300		16,06	16,00	16,06	16,00	16,06	16,00	16,06	16,00	16,06	16,00	16,06	16,00	
400		16,09	16,00	16,09	16,00	16,09	16,00	16,08	16,00	16,08	16,00	16,08	16,00	
500		16,11	16,00	16,11	16,00	16,11	16,00	16,10	16,00	16,10	16,00	16,10	16,00	
1000		16,23	16,00	16,23	16,00	16,23	16,00	16,21	16,00	16,21	16,00	16,21	16,00	
1500		16,37	16,00	16,37	16,03	16,37	16,04	16,32	16,00	16,32	16,00	16,32	16,00	
2000		-	-	-	-	-	-	16,46	16,00	16,46	16,00	16,46	16,00	
20,00		1	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
	100	20,04	20,00	20,04	20,00	20,04	20,00	20,03	20,00	20,03	20,00	20,03	20,00	
	200	20,07	20,00	20,07	20,00	20,07	20,00	20,06	20,00	20,06	20,00	20,06	20,00	
	300	20,11	20,00	20,11	20,00	20,11	20,00	20,10	20,00	20,10	20,00	20,10	20,00	
	400	20,15	20,00	20,15	20,00	20,15	20,00	20,13	20,00	20,13	20,00	20,13	20,00	
	500	20,19	20,04	20,19	20,03	20,19	20,04	20,17	20,00	20,17	20,00	20,17	20,00	
	1000	20,41	20,07	20,41	20,06	20,41	20,07	20,36	20,00	20,36	20,00	20,36	20,00	
	1500	-	-	-	-	-	-	20,58	20,00	20,58	20,00	20,58	20,00	
	24,00	1	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
		100	24,06	24,00	24,06	24,00	24,06	24,00	24,05	24,00	24,05	24,00	24,05	24,00
200		24,13	24,00	24,13	24,00	24,13	24,00	24,11	24,00	24,11	24,00	24,11	24,00	
300		24,20	24,00	24,20	24,00	24,20	24,00	24,17	24,00	24,17	24,00	24,17	24,00	
400		24,27	24,00	24,27	24,00	24,27	24,00	24,23	24,00	24,23	24,00	24,23	24,00	
500		24,34	24,06	24,34	24,06	24,34	24,07	24,30	24,00	24,30	24,00	24,30	24,00	
1000		24,76	24,14	24,76	24,12	24,76	24,14	24,65	24,00	24,65	24,20	24,65	24,30	
1500		-	-	-	-	-	-	25,10	24,00	25,10	24,24	25,10	24,39	

Tabela 18 - Comprimentos da trinca. Resultados obtidos experimentalmente e através do modelo de Willenborg. (Cont.)

		(5000 ± 2500)N + (7500 ± 2500)N						(5000 ± 2500)N + (8000 ± 2500)N						
		2º PROGRAMA 1º ENSAIO		2º PROGRAMA 2º ENSAIO		3º PROGRAMA Blocos (10,00-18,00) (14,00-22,00)		2º PROGRAMA 1º ENSAIO		2º PROGRAMA 2º ENSAIO		3º PROGRAMA Blocos (10,00-18,00) (14,00-22,00)		
		Compr. da trinca	al Experimen tal	Compr. da trinca	a2 Experimen tal	Compr. da trinca	a3 Experimen tal	Compr. da trinca	al Experimen tal	Compr. da trinca	a2 Experimen tal	Compr. da trinca	a3 Experimen tal	
		Willenborg		Willenborg		Willenborg		Willenborg		Willenborg		Willenborg		
8,00	1	8,000	8,000	8,000	8,000	-	-	8,000	8,000	8,000	8,000	-	-	
	100	8,005	8,000	8,005	8,000	-	-	8,004	8,000	8,004	8,000	-	-	
	200	8,010	8,000	8,010	8,000	-	-	8,008	8,000	8,008	8,000	-	-	
	300	8,016	8,000	8,016	8,000	-	-	8,013	8,000	8,013	8,000	-	-	
	400	8,021	8,000	8,021	8,000	-	-	8,017	8,000	8,017	8,000	-	-	
	500	8,026	8,000	8,026	8,000	-	-	8,022	8,000	8,022	8,000	-	-	
	1000	8,054	8,000	8,054	8,000	-	-	8,046	8,000	8,046	8,000	-	-	
	1500	8,084	8,000	8,084	8,000	-	-	8,072	8,000	8,072	8,000	-	-	
	2000	8,117	8,000	8,117	8,000	-	-	8,099	8,000	8,099	8,000	-	-	
	2500	8,151	8,000	8,151	8,000	-	-	8,129	8,000	8,129	8,000	-	-	
	3000	8,188	8,000	8,188	8,000	-	-	8,161	8,000	8,161	8,000	-	-	
	3500	8,229	8,000	8,229	8,000	-	-	8,196	8,000	8,196	8,000	-	-	
	4000	-	-	-	-	-	-	8,232	8,000	8,232	8,000	-	-	
4500	-	-	-	-	-	-	8,272	8,000	8,272	8,000	-	-		
12,00	1	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	
	100	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	
	200	12,02	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	12,01	12,00	
	300	12,03	12,00	12,03	12,00	12,03	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	12,02	12,00	
	400	12,04	12,00	12,04	12,00	12,04	12,00	12,03	12,00	12,03	12,00	12,03	12,00	
	500	12,05	12,00	12,05	12,00	12,05	12,00	12,04	12,00	12,04	12,00	12,04	12,00	
	1000	12,10	12,00	12,10	12,00	12,10	12,00	12,09	12,00	12,09	12,00	12,09	12,00	
	1500	12,16	12,00	12,16	12,00	12,16	12,00	12,14	12,00	12,14	12,00	12,14	12,00	
	2000	12,22	12,00	12,22	12,00	12,22	12,00	12,19	12,00	12,19	12,00	12,19	12,00	
	2500	12,29	12,00	12,29	12,00	12,29	12,00	12,25	12,00	12,25	12,00	12,25	12,00	
	3000	12,36	12,00	12,36	12,00	12,36	12,00	12,31	12,00	12,31	12,00	12,31	12,00	
	3500	-	-	-	-	-	-	12,38	12,00	12,38	12,00	12,38	12,00	
	4000	-	-	-	-	-	-	12,45	12,00	12,45	12,00	12,45	12,00	
16,00	1	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	
	100	16,02	16,00	16,02	16,00	16,02	16,00	16,01	16,00	16,01	16,00	16,01	16,00	
	200	16,03	16,00	16,03	16,00	16,03	16,00	16,03	16,00	16,03	16,00	16,03	16,00	
	300	16,05	16,00	16,05	16,00	16,05	16,00	16,04	16,00	16,04	16,00	16,04	16,00	
	400	16,07	16,00	16,07	16,00	16,07	16,00	16,06	16,00	16,06	16,00	16,06	16,00	
	500	16,09	16,00	16,09	16,00	16,09	16,00	16,07	16,00	16,07	16,00	16,07	16,00	
	1000	16,18	16,00	16,18	16,00	16,18	16,00	16,15	16,00	16,15	16,00	16,15	16,00	
	1500	16,29	16,00	16,29	16,00	16,29	16,00	16,24	16,00	16,24	16,00	16,24	16,00	
	2000	16,40	16,00	16,40	16,00	16,40	16,00	16,34	16,00	16,34	16,00	16,34	16,00	
	2500	16,53	16,00	16,53	16,00	16,53	16,00	16,44	16,00	16,44	16,00	16,44	16,00	
	3000	16,67	16,00	16,67	16,00	16,67	16,00	16,56	16,00	16,56	16,00	16,56	16,00	
	3500	-	-	-	-	-	-	16,69	16,00	16,69	16,00	16,69	16,00	
	20,00	1	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
100		20,03	20,00	20,03	20,00	20,03	20,00	20,02	20,00	20,02	20,00	20,02	20,00	
200		20,05	20,00	20,05	20,00	20,05	20,00	20,05	20,00	20,05	20,00	20,05	20,00	
300		20,09	20,00	20,09	20,00	20,09	20,00	20,07	20,00	20,07	20,00	20,07	20,00	
400		20,12	20,00	20,12	20,00	20,12	20,00	20,09	20,00	20,09	20,00	20,09	20,00	
500		20,15	20,00	20,15	20,00	20,15	20,00	20,12	20,00	20,12	20,00	20,12	20,00	
1000		20,32	20,00	20,32	20,00	20,32	20,00	20,26	20,00	20,26	20,00	20,26	20,00	
1500		20,50	20,00	20,50	20,00	20,50	20,00	20,42	20,00	20,42	20,00	20,42	20,00	
2000		20,72	20,00	20,72	20,00	20,72	20,00	20,60	20,00	20,60	20,00	20,60	20,00	
2500		20,97	20,00	20,97	20,00	20,97	20,00	20,80	20,00	20,80	20,00	20,80	20,00	
3000		-	-	-	-	-	-	21,04	20,00	21,04	20,00	21,04	20,00	
24,00		1	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
		100	24,05	24,00	24,05	24,00	24,05	24,00	24,04	24,00	24,04	24,00	24,04	24,00
	200	24,10	24,00	24,10	24,00	24,10	24,00	24,08	24,00	24,08	24,00	24,08	24,00	
	300	24,15	24,00	24,15	24,00	24,15	24,00	24,12	24,00	24,12	24,00	24,12	24,00	
	400	24,20	24,00	24,20	24,00	24,20	24,00	24,16	24,00	24,16	24,00	24,16	24,00	
	500	24,26	24,14	24,26	24,14	24,26	24,05	24,21	24,00	24,21	24,17	24,21	24,10	
	1000	24,56	24,14	24,56	24,14	24,56	24,05	24,46	24,00	24,46	24,17	24,46	24,10	
	1500	24,93	24,21	24,93	24,14	24,93	24,05	24,75	24,00	24,75	24,17	24,75	24,10	
	2000	25,38	24,21	25,38	24,14	25,38	24,10	25,11	24,00	25,11	24,17	25,11	24,10	
	2500	-	-	-	-	-	-	25,55	24,00	25,55	24,17	25,55	24,10	

modelo de Willenborg, comparado com os resultados experimentais obtidos; ou seja, na realidade o efeito do retardo no crescimento da fissura é muito mais sensível e eficaz na prática do que as informações obtidas pelo emprego do modelo de Willenborg. Por exemplo, para a relação  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$  igual a 1,40, com o retorno da sobrecarga para a carga de referência ocorrendo no comprimento da trinca por fadiga de 16,00 mm, o modelo de Willenborg fornece para as amostras ensaiadas no segundo e terceiro programas de ensaios, um comprimento da fissura após 3500 ciclos, de 16,69 mm enquanto que experimentalmente o valor obtido foi de 16,00mm. Este mesmo comportamento pode ser verificado de maneira geral nos dados fornecidos na tabela 18, ou seja, o modelo de Willenborg subestima o efeito do retardo na propagação da fissura, fornecendo um comprimento de trinca maior do que o observado experimentalmente, após um certo número de ciclos de atuação da carga de referência.

Um comentário que deve ser feito ainda com relação ao modelo de Willenborg diz respeito ao período de atuação do modelo, em outras palavras, o número de ciclos na carga de referência após a sequência descendente de carregamento em que o modelo ainda tem validade. Estudando o modelo, verificamos que a medida em que a trinca por fadiga cresce dentro da zona plástica criada pela sobrecarga, o requerido decresce. Quando  $\sigma_{requerido} = \sigma_{m\acute{a}x} 2,i$ , resulta  $\sigma_{reduzido} = 0$  e o retardo não mais será aplicado.

Este número de ciclos de atuação do retardo na propagação da fissura segundo o modelo de Willenborg; ou seja, de utilização do  $K$  reduzido =  $K$  requerido -  $K_{m\acute{a}x} 2,i$  na equação de Forman para a determinação de  $\frac{da}{dN}$  segundo a expressão:



$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K_{ef})^n}{(1-R_{ef})K_c - \Delta K_{ef}}$$

onde:  $\Delta K_{ef_{2,i}} = K_{m\acute{a}x_{ef_{2,i}}} - K_{m\acute{i}n_{ef_{2,i}}} = (K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{red}) - (K_{m\acute{i}n_{2,i}} - K_{red})$

$$R_{ef_{2,i}} = \frac{K_{m\acute{i}n_{2,i}} - K_{red}}{K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{red}}$$

para as rela $\tilde{c}$ o $\tilde{e}$ s  $\frac{K_{m\acute{a}x_{S.c}}}{K_{m\acute{a}x_{C.r}}}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40 e todos os pontos onde ocorreu o carregamento alto-baixo, est $\tilde{a}$ o representados na tabela 19.

Na tabela 19 est $\tilde{a}$ o representados, para todos os quocientes  $\frac{K_{m\acute{a}x_{S.c}}}{K_{m\acute{a}x_{C.r}}}$  estudados, a dimens $\tilde{a}$ o da zona pl $\acute{a}$ stica na ponta da trinca criada pela sobrecarga, o comprimento da fissura at $\tilde{e}$  onde ocorre influ $\tilde{e}$ ncia da zona pl $\acute{a}$ stica no crescimento da trinca, o n $\acute{u}$ mero de ciclos de carregamento na carga baixa, at $\tilde{e}$  onde o modelo de Willenborg  $\acute{e}$  atuante e o n $\acute{u}$ mero de ciclos obtidos experimentalmente no primeiro ensaio do segundo programa de ensaios (com excess $\tilde{a}$ o do comprimento da trinca de 20,00 mm, para o qual foram usados os resultados do terceiro programa de ensaios), necess $\tilde{a}$ rios para que a trinca percorra toda a extens $\tilde{a}$ o da zona pl $\acute{a}$ stica criada pela carga alta.

Analisando os dados da tabela 19 fica claro que para todas as rela $\tilde{c}$ o $\tilde{e}$ s  $\frac{K_{m\acute{a}x_{S.c}}}{K_{m\acute{a}x_{C.r}}}$  e todos os comprimentos da trinca, o n $\acute{u}$ mero de ciclos obtidos experimentalmente necess $\tilde{a}$ rios para a fissura atravessar a zona pl $\acute{a}$ stica  $\acute{e}$  muito maior do que o n $\acute{u}$ mero de ciclos at $\tilde{e}$  onde o modelo de Willenborg pode ser empregado em fun $\tilde{c}$ o $\tilde{e}$  de suas restri $\tilde{c}$ o $\tilde{e}$ s. Conseq $\tilde{u}$ entemente, o comprimento da trinca por fadiga calculado pelo modelo de Willenborg at $\tilde{e}$

Tabela 19 - Número de ciclos de atuação do modelo de Willenborg.

Compr. Trinca (mm)	(5000±2500)N → (6500±2500)N						(5000±2500)N → (7000±2500)N						(5000±2500)N → (7500±2500)N						(5000±2500)N → (8000±2500)N					
	Zona Plást. (mm)	Compr. Trinca (mm)	Nº Ciclos (Willenb)	Nº Ciclos (Exp.)	Zona Plást. (mm)	Compr. Trinca (mm)	Nº Ciclos (Willenb)	Nº Ciclos (Exp.)	Zona Plást. (mm)	Compr. Trinca (mm)	Nº Ciclos (Willenb)	Nº Ciclos (Exp.)	Zona Plást. (mm)	Compr. Trinca (mm)	Nº Ciclos (Willenb)	Nº Ciclos (Exp.)	Zona Plást. (mm)	Compr. Trinca (mm)	Nº Ciclos (Willenb)	Nº Ciclos (Exp.)				
8,00	0,451	8,451	1814 8,13	9000	0,503	8,503	2608 8,18	14400	0,557	8,557	3527 8,23	21000	0,614	8,614	4651 8,28	35800								
12,00	0,834	12,83	1703 12,23	9500	0,929	12,92	2450 12,32	15200	1,029	13,02	3314 12,42	18300	1,135	13,13	4370 12,51	34200								
16,00	1,412	17,41	1550 16,38	10000	1,573	17,57	2228 16,53	14350	1,743	17,74	3011 16,68	17800	1,922	17,92	3968 16,83	41750								
20,00	2,297	22,29	1347 20,59	9200	2,559	22,55	1933 20,80	12700	2,836	22,83	2609 21,03	20900	3,127	23,12	3433 21,27	36300								
24,00	3,668	27,66	1093 24,86	6800	4,087	28,08	1565 25,17	10650	4,528	28,52	2106 25,50	14350	4,993	28,99	2764 25,84	38900								

onde a sua utilização é válida, é muito menor do que o comprimento da fissura necessário para percorrer toda a zona plástica, ou seja, o modelo de Willenborg não consegue, de maneira total e correta, representar o efeito do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga como resultado da aplicação de blocos de sobrecargas.

Verificamos, assim, duas restrições na utilização do modelo de Willenborg para representar a atuação do retardo no crescimento da fissura; o rápido crescimento da trinca estando a amostra submetida a um carregamento na carga baixa comparado com os valores determinados experimentalmente e a curta duração, em termos do número de ciclos ou do comprimento efetivo da trinca, do fenômeno do retardo de acordo com o modelo, face ao significativo desempenho do atraso na propagação da trinca verificado na prática.

Com relação à segunda restrição, ela realmente é significativa para os resultados obtidos através do segundo e terceiro programa de ensaios, nos quais é longa a extensão do ensaio na carga baixa após a seqüência descendente de carregamento e por este motivo, o número de ciclos em que o modelo de Willenborg é viável, é pequeno comparado com o necessário para percorrer toda a extensão da zona plástica responsável pelo atraso na propagação da fissura. No entanto se observarmos um espectro real de carregamento ao qual estruturas mecânicas normalmente estão solicitadas em serviço, podemos verificar que o mesmo é composto por uma seqüência de cargas de maior ou menor amplitude e que deste modo ocorrendo um retardo no crescimento da trinca em decorrência de uma possível sobrecarga, a sua duração não é tão extensa, podendo ocorrer a presença de outros efei

tos de interação, resultantes do carregamento. Assim, a nossa preocupação não deve ser a duração do efeito do retardo segundo o modelo de Willenborg, mas sim a primeira restrição observada na utilização do mesmo que é o rápido crescimento da trinca relativo aos dados experimentais.

#### 4.5.2.2 Estudo dos Parâmetros que efetuam a relação

$$\frac{K \text{ red exp.}}{K \text{ red Willenborg}}$$

Analisando mais uma vez o significado físico do modelo de Willenborg verificamos que o parâmetro responsável pela divergência entre os valores teóricos e os dados empíricos é o K reduzido.

Na tabela 20 estão representados para os quocientes  $\frac{K \text{ máx S.c}}{K \text{ máx C.r}}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40 e para os pontos em que ocorreu o carregamento de seqüência descendente, as relações entre K reduzido experimental e K reduzido segundo o modelo de Willenborg, para os resultados obtidos no segundo e terceiro programa de ensaios, em função do número de ciclos na carga baixa após o retorno da sobrecarga a este valor.

Antes de fazer algum comentário com relação aos resultados apresentados na tabela 20, convém observar que os valores de K reduzido do modelo de Willenborg, foram calculados pelo mesmo e para a determinação do K reduzido experimental, foi utilizado o procedimento descrito a seguir. Após um determinado número de ciclos na carga baixa, é obtido o valor experimental do comprimento da trinca. Com este valor, verifica-se os resultados fornecidos pelo modelo de Willenborg e se determina o K reduzido necessário para que após o mesmo número de ciclos a

Tabela 20 - Relações entre K reduzido experimental e K reduzido do modelo de Willenborg.

Compr. Trinca (mm)	nº de Ciclos	(6500±2500)N + (5000±2500)N			(7000±2500)N + (5000±2500)N			(7500±2500)N + (5000±2500)N			(8000±2500)N + (5000±2500)N			
		K red 1	K red 2	K red 3	K red 1	K red 2	K red 3	K red 1	K red 2	K red 3	K red 1	K red 2	K red 3	
		K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	K red W	
8,00	1	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	1,00	1,00	-	
	100	1,046	1,046	-	1,029	1,029	-	1,020	1,020	-	1,013	1,013	-	
	200	1,099	1,099	-	1,062	1,062	-	1,041	1,041	-	1,026	1,026	-	
	300	1,159	1,159	-	1,097	1,097	-	1,064	1,064	-	1,041	1,041	-	
	400	1,227	1,227	-	1,135	1,135	-	1,088	1,088	-	1,056	1,056	-	
	500	1,305	1,305	-	1,177	1,177	-	1,114	1,114	-	1,072	1,072	-	
	1000	1,985	1,985	-	1,463	1,463	-	1,273	1,273	-	1,166	1,166	-	
	1500	3,064	3,064	-	2,005	2,005	-	1,510	1,510	-	1,293	1,293	-	
	2000	-	-	-	3,431	3,431	-	1,899	1,899	-	1,467	1,467	-	
	2500	-	-	-	17,92	17,92	-	2,664	2,664	-	1,721	1,721	-	
	3000	-	-	-	-	-	-	4,869	4,869	-	2,127	2,127	-	
	3500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,882	2,882	-	
	4000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,787	4,787	-	
	4500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,23	19,23	-	
12,00	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	100	1,049	1,049	1,049	1,031	1,031	1,031	1,021	1,021	1,021	1,013	1,013	1,013	
	200	1,106	1,106	1,106	1,065	1,065	1,065	1,044	1,044	1,044	1,028	1,028	1,028	
	300	1,170	1,170	1,170	1,103	1,103	1,103	1,068	1,068	1,068	1,043	1,043	1,043	
	400	1,244	1,244	1,244	1,144	1,144	1,144	1,094	1,094	1,094	1,059	1,059	1,059	
	500	1,330	1,330	1,330	1,189	1,189	1,189	1,121	1,121	1,121	1,076	1,076	1,076	
	1000	2,128	2,128	2,128	1,507	1,507	1,293	1,294	1,294	1,294	1,177	1,177	1,177	
	1500	6,281	5,456	6,281	2,157	2,157	1,850	1,561	1,561	1,561	1,316	1,316	1,316	
	2000	-	-	-	4,241	4,241	3,637	2,029	2,029	2,029	1,513	1,513	1,513	
	2500	-	-	-	-	-	-	3,066	3,066	3,066	1,814	1,814	1,814	
	3000	-	-	-	-	-	-	7,385	7,385	7,385	2,332	2,332	2,332	
	3500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,439	3,201	3,439	
	4000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,514	6,994	7,514	
	16,00	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100		1,054	1,054	1,054	1,034	1,034	1,034	1,023	1,023	1,023	1,014	1,014	1,014	
200		1,116	1,116	1,116	1,071	1,071	1,071	1,047	1,047	1,047	1,030	1,030	1,030	
300		1,189	1,189	1,189	1,113	1,113	1,113	1,074	1,074	1,074	1,046	1,046	1,046	
400		1,273	1,273	1,273	1,159	1,159	1,159	1,102	1,102	1,102	1,064	1,064	1,064	
500		1,374	1,374	1,374	1,209	1,209	1,168	1,133	1,133	1,133	1,082	1,082	1,082	
1000		2,424	2,424	2,424	1,589	1,589	1,477	1,331	1,242	1,278	1,197	1,197	1,197	
1500		21,99	22,59	21,99	2,483	2,483	2,309	1,659	1,548	1,592	1,359	1,359	1,359	
2000		-	-	-	7,274	7,274	6,764	2,306	2,151	2,214	1,603	1,603	1,603	
2500		-	-	-	-	-	-	3,981	3,811	4,038	2,010	2,010	2,010	
3000		-	-	-	-	-	-	149,6	154,3	163,5	2,832	2,832	2,832	
3500		-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,392	5,392	5,392	
20,00		1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		100	1,061	1,061	1,061	1,038	1,038	1,038	1,026	1,026	1,026	1,016	1,016	1,016
	200	1,134	1,134	1,134	1,081	1,081	1,081	1,054	1,054	1,054	1,034	1,034	1,034	
	300	1,221	1,221	1,221	1,129	1,129	1,129	1,084	1,084	1,084	1,052	1,052	1,052	
	400	1,325	1,325	1,325	1,184	1,184	1,184	1,117	1,117	1,117	1,073	1,073	1,073	
	500	1,361	1,385	1,361	1,246	1,246	1,246	1,153	1,153	1,153	1,094	1,094	1,094	
	1000	2,844	2,897	2,844	1,753	1,753	1,550	1,326	1,313	1,351	1,232	1,232	1,232	
	1500	-	-	-	3,413	3,413	3,018	1,717	1,749	1,799	1,442	1,442	1,442	
	2000	-	-	-	-	-	-	2,837	2,781	2,974	1,795	1,795	1,795	
	2500	-	-	-	-	-	-	14,08	13,81	14,76	2,519	2,519	2,412	
	3000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,892	4,684	4,684	
	24,00	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		100	1,075	1,075	1,075	1,046	1,046	1,046	1,030	1,030	1,030	1,019	1,019	1,019
		200	1,167	1,167	1,167	1,099	1,099	1,099	1,064	1,064	1,064	1,040	1,040	1,040
300		1,282	1,282	1,282	1,160	1,160	1,160	1,102	1,102	1,102	1,063	1,063	1,063	
400		1,429	1,429	1,429	1,232	1,232	1,232	1,144	1,144	1,144	1,088	1,088	1,088	
500		1,518	1,518	1,500	1,317	1,317	1,317	1,154	1,154	1,154	1,115	1,115	1,115	
1000		7,696	7,696	7,496	2,183	1,831	1,653	1,415	1,415	1,502	1,302	1,192	1,237	
1500		-	-	-	16,16	13,03	11,03	2,159	2,268	2,407	1,632	1,494	1,551	
2000		-	-	-	-	-	-	10,50	11,03	11,33	2,381	2,179	2,263	
2500		-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,908	5,488	5,614	

fissura tivesse o comprimento observado experimentalmente.

Assim, fixado o número de ciclos na carga baixa, obtêm-se o  $K$  reduzido do modelo de Willenborg e com o valor experimental do comprimento da trinca após este mesmo número de ciclos, determina-se o  $K$  reduzido experimental que seria necessário para que o modelo de Willenborg fornecesse o valor obtido empiricamente. Na tabela 20 encontramos a relação  $\frac{K_{red\ 1}}{K_{red\ W}}$ ,  $\frac{K_{red\ 2}}{K_{red\ W}}$  referentes respectivamente, ao primeiro e segundo ensaios do segundo programa de ensaios e  $\frac{K_{red\ 3}}{K_{red\ W}}$  associado ao terceiro programa de ensaios.

Para entendermos o comportamento da relação entre  $K$  reduzido experimental e  $K$  reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg em função dos vários parâmetros envolvidos no efeito do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga, vamos fixar para análise, 1000 ciclos na carga de referência após o retorno à carga baixa. Assim, para os quocientes  $\frac{K_{m\acute{a}x\ S.c}}{K_{m\acute{a}x\ C.r}}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40 para o comprimento da trinca de 8,00mm, os valores de  $\frac{K_{red\ 1}}{K_{red\ W}}$  são, respectivamente, 1,985, 1,463, 1,273 e 1,166; ou seja, é visível o efeito da relação  $\frac{K_{m\acute{a}x\ S.c}}{K_{m\acute{a}x\ C.r}}$  no quociente entre  $K$  reduzido experimental e o  $K$  reduzido do modelo de Willenborg.

Um outro fator a ser analisado é o número de ciclos na carga alta a que a amostra está submetida antes do carregamento de seqüência descendente. Assim, para a relação  $\frac{K_{m\acute{a}x\ S.c}}{K_{m\acute{a}x\ C.r}}$  igual a 1,40 no primeiro ensaio do segundo programa de ensaios os valores de  $\frac{K_{red\ 1}}{K_{red\ W}}$  para os comprimentos da trinca de 8,00mm e 16,00mm após 1000 ciclos de aplicação da carga de referência são, respectivamente, 1,166 e 1,197. Deve ser lembrado que um

número diferente de ciclos na carga alta está associado aos comprimentos da trinca de 8,00 mm e 16,00 mm, mostrando portanto, este exemplo, que o número de ciclos na carga alta é um parâmetro que juntamente com a relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  deve ser estudado com mais detalhes pois tem uma certa influência no quociente entre K reduzido experimental e K reduzido do modelo de Willenborg.

Um último parâmetro que claramente atua na relação  $\frac{K \text{ reduzido experimental}}{K \text{ reduzido Willenborg}}$  é o número de ciclos a que o espécime está submetido na carga baixa após o retorno da sobrecarga ã carga de referência; em outras palavras, o número de ciclos em que a trinca está se propagando dentro da zona plástica criada pela carga alta.

Assim, devem ser estudados com mais detalhes as influências dos fatores  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ , número de ciclos na carga alta e número de ciclos na carga baixa na relação entre o K reduzido experimental e o K reduzido Willenborg, para a determinação correta do modelo que represente o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga.

4.5.2.3 Análise da influência de cada um dos parâmetros,  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ , número de ciclos na carga alta e número de ciclos na carga baixa, no fator  $\frac{K \text{ red. experimental}}{K \text{ red. Willenborg}}$

Para poder observar a influência de cada um dos fatores que atuam no valor da relação entre K reduzido experimental e K reduzido segundo o modelo de Willenborg, analisamos individualmente o comportamento do fator  $\frac{K \text{ reduzido experimental}}{K \text{ reduzido Willenborg}}$  em

função dos parâmetros que o afetam, como pode ser verificado nas figuras 76, 77 e 78.

O valor de K reduzido experimental utilizado na construção das curvas que serão representadas a seguir se refere aos dados experimentais obtidos no primeiro ensaio do segundo programa de ensaios. Como os outros resultados estão bem semelhantes ao que será utilizado aqui, as conclusões a serem tiradas valem para todo o conjunto de informações empíricas obtido experimentalmente.

Na figura 76, está representado o comportamento da relação entre K reduzido experimental 1 e K reduzido segundo o modelo de Willenborg em função do quociente  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ , para o comprimento da trinca por fadiga de 8,00 mm. Assim, fixamos os parâmetros número de ciclos na carga alta (dado pelos comprimentos da fissura de 8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm) e número de ciclos na carga baixa e analisamos a influência do fator  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  na relação entre K reduzido experimental 1 e K reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg.

Um comportamento geral observado, é que independente do número de ciclos na carga alta, a função entre

$$\frac{K \text{ reduzido experimental } 1}{K \text{ reduzido Willenborg}} \text{ e } \frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$$

é linear até aproximadamente 500 ciclos de carregamento na carga baixa, isto é, 500 ciclos após o retorno da sobrecarga à carga de referência. Acima de 500 ciclos na carga baixa, para qualquer valor de número de ciclos na carga alta, o comportamento deixa de ser linear. Através dos resultados indicados na figura 76 é claro e indiscutível o efeito da relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  no



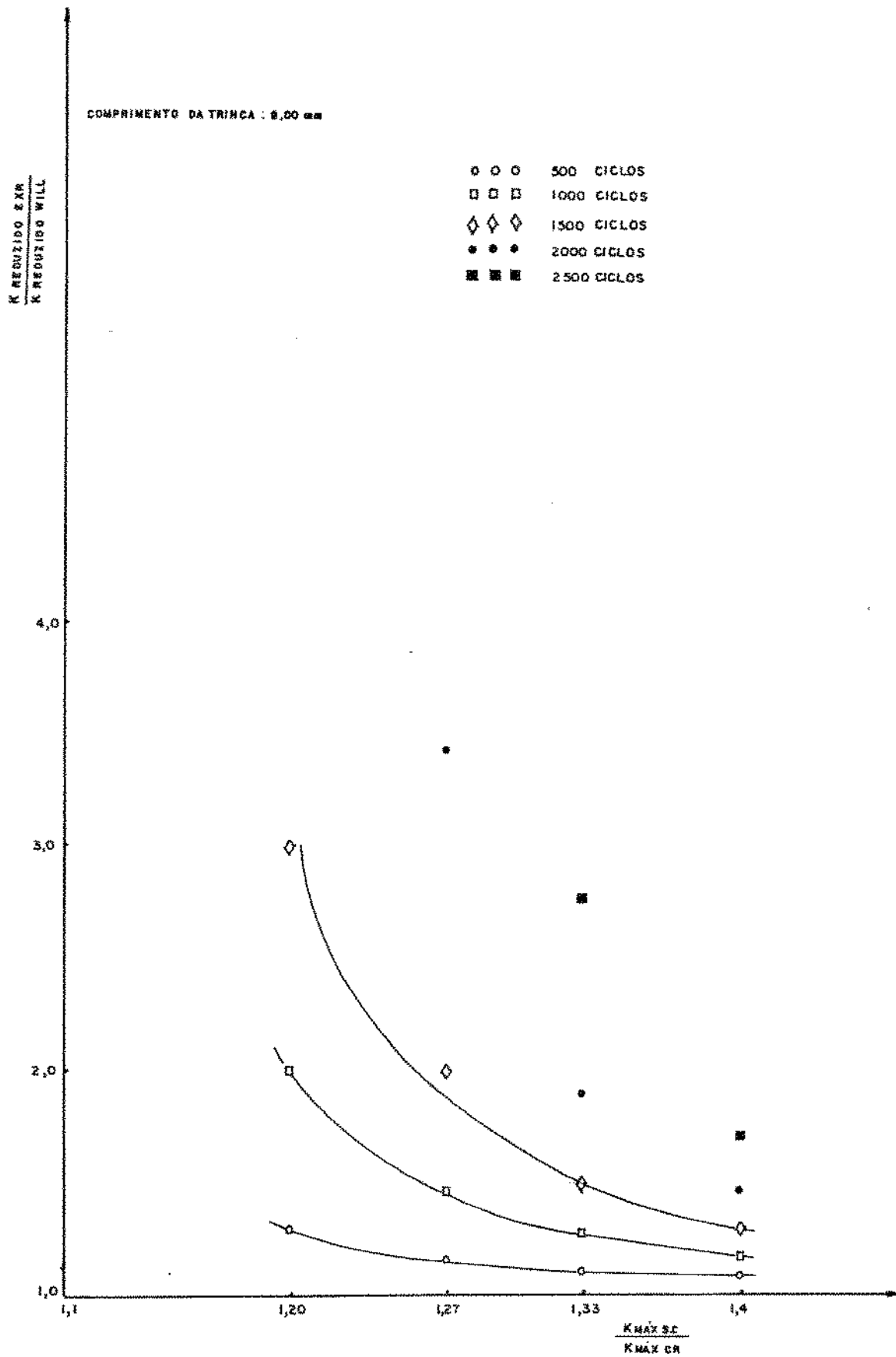


Figura 76 - Relação entre  $\frac{K_{red.\ exp.}}{K_{red.\ Will}}$  e  $\frac{K_{max\ S.C.}}{K_{max\ C.R.}}$ .

fator  $\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}$  e que assim, o mesmo será utilizado numa possível correção do modelo de Willenborg.

O segundo parâmetro a ser analisado é o número de ciclos na carga alta e os resultados podem ser observados na figura 77, que representa, respectivamente, o comportamento entre o fator  $\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}$  e o número de ciclos na carga alta, para a relação  $\frac{K \text{ máx S.c.}}{K \text{ máx C.r}}$  igual a 1,40.

Uma informação extremamente interessante obtida é que para as relações  $\frac{K \text{ máx S.c.}}{K \text{ máx C.r}}$  iguais a 1,20 e 1,27, praticamente não há influência do número de ciclos na carga alta na relação entre  $K \text{ reduzido experimental } l$  e  $K \text{ reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg}$  até 1000 ciclos de carregamento na carga baixa, enquanto que para os quocientes entre  $\frac{K \text{ máx S.c.}}{K \text{ máx C.r}}$  iguais a 1,33 e 1,40 a relação entre  $\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}$  e o número de ciclos na carga alta é constante até em torno de 1500 ciclos na carga baixa. Uma outra observação que pode ser feita com base nos resultados experimentais obtidos é que para as relações  $\frac{K \text{ máx S.c.}}{K \text{ máx C.r}}$  iguais a 1,27, 1,33 e 1,40 a influência do número de ciclos na carga alta no quociente entre  $K \text{ reduzido experimental } l$  e  $K \text{ reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg}$  (a partir do número de ciclos na carga baixa até o qual não há efeito do número de ciclos na carga alta na relação  $\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}$ ) é grande até um número de ciclos na carga alta no intervalo aproximado de 4000 ciclos a 8000 ciclos, a partir do qual não há interferência alguma do número de ciclos na carga alta no quociente  $\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}$ .

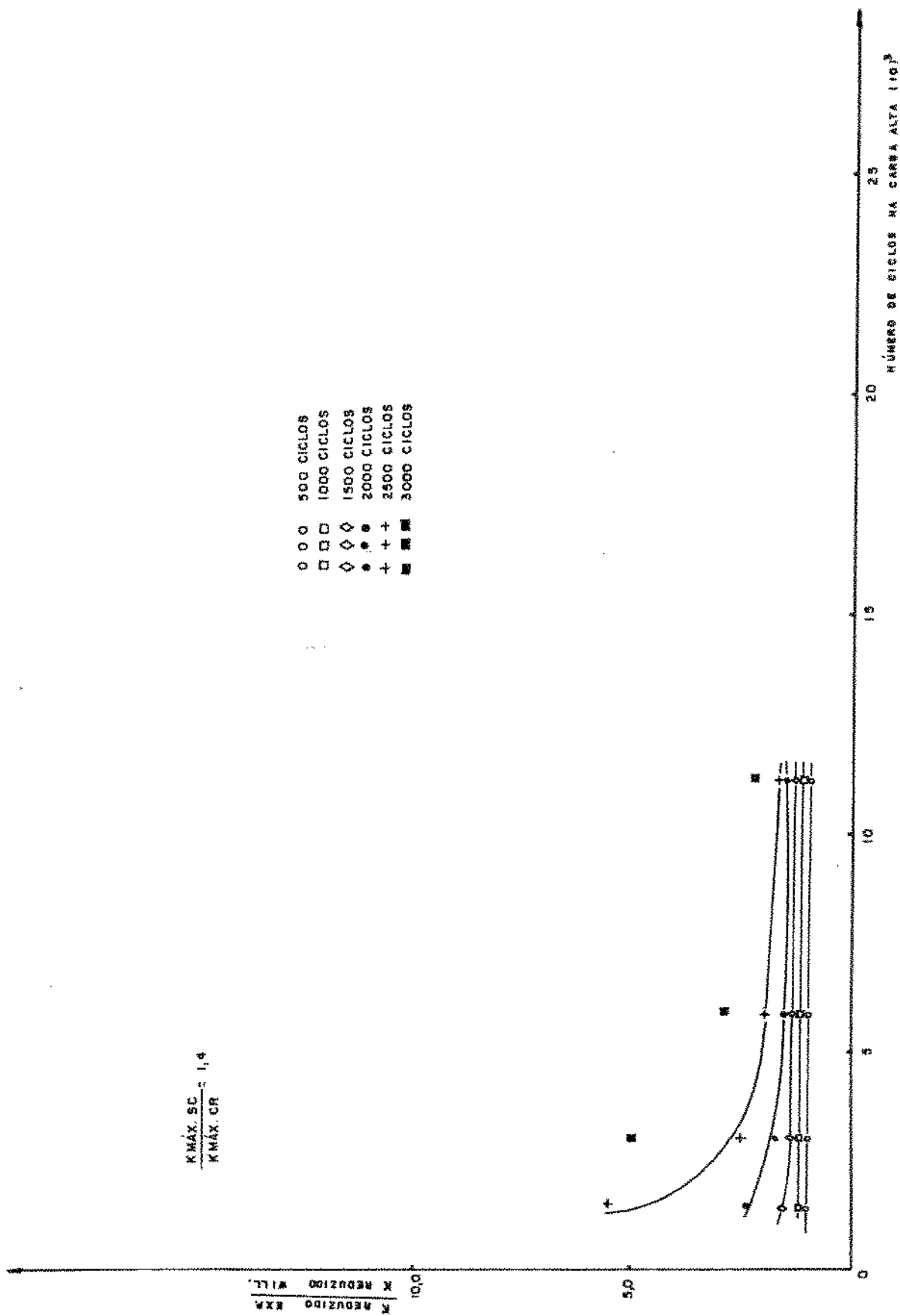


Figura 77 - Relação entre  $\frac{K \text{ red. exp.}}{K \text{ red. Will.}}$  e o número de ciclos na carga alta.

O último parâmetro a ser analisado quanto à sua influência na relação entre  $K$  reduzido experimental  $l$  e  $K$  reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg, é o número de ciclos na carga baixa. Os resultados podem ser observados na figura 78, para a relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  igual a 1,40. Pode ser verificado que a influência do número de ciclos na carga baixa no quociente  $\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}$  efetivamente existe, sendo de comportamento linear até aproximadamente 1000 ciclos na carga baixa para as relações  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  iguais a 1,20, 1,27 e 1500 ciclos na carga baixa para as relações  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  iguais a 1,33 e 1,40. Assim, é imprescindível a presença do fator número de ciclos na carga baixa na obtenção do modelo teórico, ou melhor, na correção que será feita no modelo de Willenborg para que o mesmo possa representar bem o retardo no crescimento da fissura como resultado da aplicação de sobrecargas, para as condições experimentais utilizadas no trabalho.

#### 4.5.2.4 Determinação do modelo de Willenborg Modificado

Estudando o efeito dos parâmetros  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ , número de ciclos na carga alta e número de ciclos na carga de referência na relação entre  $K$  reduzido experimental  $l$  e  $K$  reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg, verificamos que são variáveis que efetivamente devem ser utilizadas na correção do modelo de Willenborg.

A obtenção do termo de ajuste do modelo de Willenborg aos dados experimentais, foi feita da seguinte maneira:

- a) Inicialmente foram determinados os termos A e B

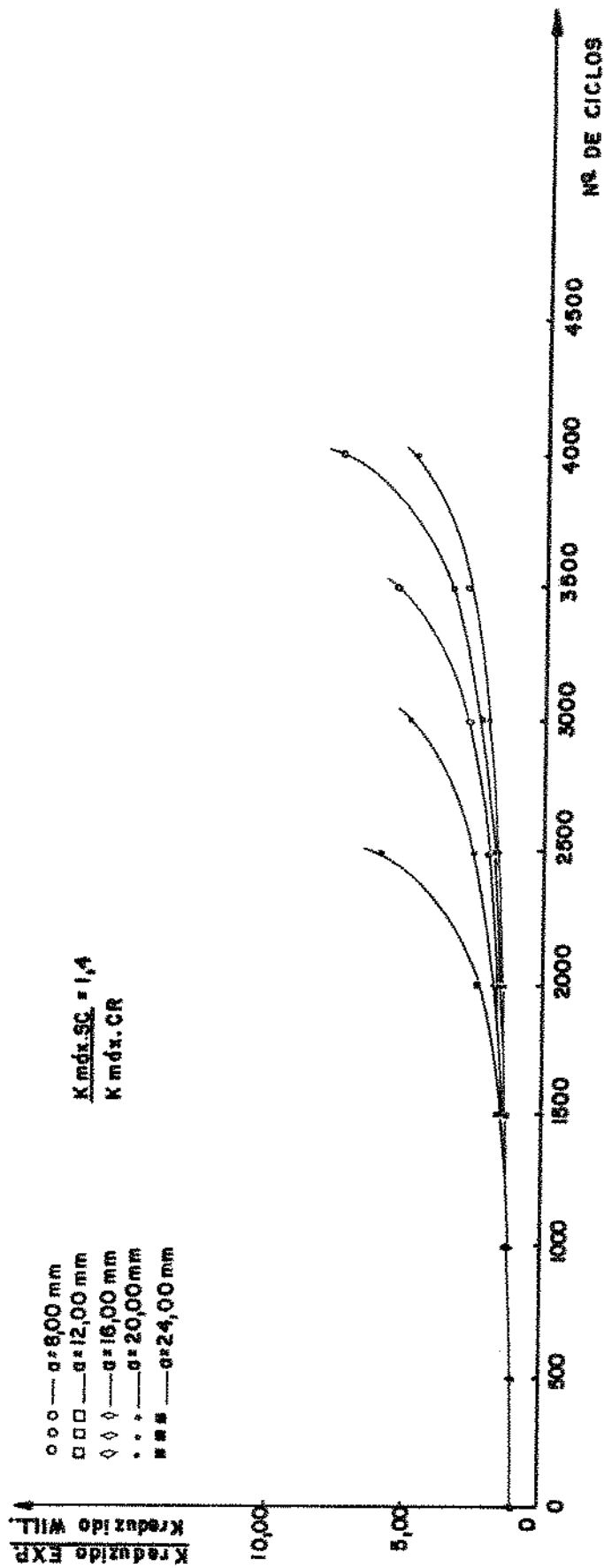


Figura 78 - Relação entre  $\frac{K \text{ red. exp.}}{K \text{ red. Will.}}$  e o número de ciclos na carga baixa.

$$\text{da equação } \frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}} = A \left( \frac{K \text{ m\AA}x \text{ S.c}}{K \text{ m\AA}x \text{ C.r}} \right)^B \quad (28)$$

para cada valor de número de ciclos na carga baixa correspondentes a cada um dos pontos em que ocorreu o carregamento de sequência descendente. Assim, por exemplo, para o comprimento da trinca de 8,00 mm, foram determinados os termos A e B da equação acima, para os valores de 1,100,200,300,400,500,1000, 1500, 2000 e 2500 ciclos na carga baixa. Para os outros valores de comprimento da trinca, 12,00mm, 16,00mm, 20,00mm e 24,00mm, foi realizado um procedimento análogo.

Utilizando uma expressão do tipo

$$\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}} = A \left( \frac{K \text{ m\AA}x \text{ S.c}}{K \text{ m\AA}x \text{ C.r}} \right)^B$$

estamos verificando a influência do parâmetro  $\frac{K \text{ m\AA}x \text{ S.c}}{K \text{ m\AA}x \text{ C.r}}$ , que como vimos tem uma grande atuação na relação entre K reduzido experimental l e K reduzido fornecido pelo modelo de Willenborg, fixadas as variáveis número de ciclos na carga alta (aqui representada pelos comprimentos da trinca de 8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm) e número de ciclos na carga baixa, após o retorno da sobrecarga ao valor de referência.

b) Obtidos os valores de A e B segundo as condições apresentadas no item a), verificamos para todos os comprimentos de trinca analisados (8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm), uma aproximação muito grande entre os resultados até em torno de 500 ciclos de carregamento na carga baixa. A partir deste número de ciclos, tanto os valores de A quanto os de B se afastam um pouco em função do número de ciclos na carga alta.

c) Obtivemos duas equações que nos fornecem A e B em função do número de ciclos na carga baixa após o carregamento

de seqüência descendente.

As expressões encontradas, para os resultados experimentais obtidos no trabalho são:

$$\begin{aligned} A &= 0,08944 (I)^{0,6947} \\ B &= -|0,0006945 (I)^{1,244}| \end{aligned} \quad (29)$$

onde I = número de ciclos na carga baixa.

Assim, a medida em que a amostra vai sendo submetido a um carregamento na carga baixa após o retorno da sobrecarga à carga de referência, o valor de I (número de ciclos na carga baixa) vai sendo alterado, ocorrendo o mesmo com os valores de A e B.

Chamando o termo  $\frac{K \text{ m\~{a}x S.c}}{K \text{ m\~{a}x C.r}}$  de Beta ( $\beta$ ), a expressão

$$\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}} = A \left( \frac{K \text{ m\~{a}x S.c}}{K \text{ m\~{a}x C.r}} \right)^B \text{ pode ser escrita}$$

da seguinte maneira :

$$\frac{K \text{ red. exp. } l}{K \text{ red. Willenborg}} = A (\beta)^B$$

Esta expressão na qual está embutida os três parâmetros que efetivamente exercem uma influência no termo

$$\frac{K \text{ reduzido experimental } l}{K \text{ reduzido Willenborg}}, \text{ a saber, o quociente } \frac{K \text{ m\~{a}x S.c}}{K \text{ m\~{a}x C.r}}, \text{ n\~{u}me}$$

ro de ciclos na carga alta e número de ciclos na carga baixa após o retorno da sobrecarga à carga de referência, vai ajustar o modelo de Willenborg aos valores determinados empiricamente.

Voltando ao modelo de Willenborg, podemos verificar que a expressão utilizada para a determinação da taxa de crescimento da trinca por ciclo de atuação da carga baixa após o carregamento de sequência descendente, é a seguinte:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K_{ef})^n}{(1-R_{ef}) K_c - \Delta K_{ef}}$$

onde :

$$\Delta K_{ef_{2,i}} = K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{m\acute{i}n_{2,i}} =$$

$$= (K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{red}) - (K_{m\acute{i}n_{2,i}} - K_{red})$$

$$R_{ef_{2,i}} = \frac{K_{m\acute{i}n_{2,i}} - K_{red}}{K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{red}}$$

No termo de correção determinado para o modelo de Willenborg  $\frac{K_{red \text{ exp.1}}}{K_{red \text{ Willenborg}}} = A (\beta)^B$ , verificamos que  $K_{red}$

$\text{exp.1} = (K_{red \text{ Willenborg}}) \cdot A (\beta)^B$ . Chamando  $A (\beta)^B$  de Alfa ( $\alpha$ ), obtemos:

$$K_{red \text{ exp 1}} = (K_{red \text{ Willenborg}}) \cdot \alpha \quad (30)$$

Na expressão (30), vamos chamar  $K_{reduzido \text{ experimental 1}}$  de  $K_{reduzido \text{ modificado}}$ , que será o responsável pela maior aproximação dos valores teóricos fornecidos pelo modelo de Willenborg aos resultados obtidos experimentalmente, sendo que isto ocorrerá da seguinte maneira:

$$\Delta K_{ef_{2,i}} = (K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{red \text{ modificado}}) - (K_{m\acute{i}n_{2,i}} - K_{red \text{ modificado}})$$

$$R_{ef_{2,i}} = \frac{K_{m\acute{i}n_{2,i}} - K_{red \text{ modificado}}}{K_{m\acute{a}x_{2,i}} - K_{red \text{ modificado}}}$$



$$e \frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K_{ef})^n}{(1-R_{ef}) K_c - \Delta K_{ef}}$$

Na tabela 21 estão indicados os comprimentos da trinca determinados pelo modelo de Willenborg com a utilização de K reduzido modificado e os valores do comprimento da fissura obtidos experimentalmente, para as relações  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$  iguais a 1,20, 1,27, 1,33, 1,40 e em todos os pontos onde ocorreu a seqüência descendente de carregamento.

TABELA 21 - Resultados fornecidos pelo modelo de Willenborg modificado.

Número de Ciclos	(5000 ± 2500)N → (7000 ± 2500)N		
	2º Programa 1º Ensaio Compr. Trinca Exp.	Modelo de Willenborg	Modelo de Willenborg Modificado
1	12,00	12,00	12,00
100	12,00	12,01	12,00
200	12,00	12,02	12,01
300	12,00	12,03	12,01
400	12,00	12,04	12,02
500	12,00	12,06	12,03
1000	12,00	12,12	12,09
1500	12,00	12,18	12,15
2000	12,00	12,25	12,22
2500	12,00	-	12,30

Na tabela 21 estão indicados os valores experimentais do comprimento da trinca para o 1º Ensaio do 2º Programa

de Ensaio, para a relação  $\frac{K_{\text{máx S.c}}}{K_{\text{máx C.r}}}$  igual a 1,27 e comprimento da fissura igual a 12,00 mm, além dos resultados fornecidos pelo modelo de Willenborg e modelo de Willenborg modificado.

O que pode ser observado através da análise da tabela 21 é que o modelo de Willenborg modificado consegue representar bem o comportamento que se observa experimentalmente, até o momento em que a correção feita no parâmetro de redução (K reduzido Willenborg).  $\alpha$  ainda seja válida, segundo a conceituação assumida no modelo de Willenborg. No caso apresentado na tabela 20, o fator de redução modificado é utilizado até 303 ciclos na carga baixa após o retorno da sobrecarga do valor de referência, quando então é assumido como sendo igual a zero e a determinação do comprimento da trinca segue as etapas normais prescritas pelo modelo de Willenborg.

Apesar do parâmetro de redução modificado ter um curto período de atuação, ele é extremamente eficaz durante esta etapa, como pode ser constatado na tabela 21, para por exemplo 300 ciclos de carregamento na carga baixa após o ponto da sequência descendente de carregamento. O valor do comprimento da trinca obtido empiricamente, dentro das dificuldades experimentais encontradas, foi de 12,00 mm, enquanto os resultados fornecidos pelo modelo de Willenborg e Modelo de Willenborg modificado são, respectivamente, 12,03 mm e 12,01 mm. Se imaginarmos que um espectro real de cargas tem uma quantidade muito grande de carregamentos de sequência descendente e que em cada um deles há um certo retardo no crescimento da fissura envolvido, a soma das diferenças entre os resultados experimentais e os valores fornecidos pelo modelo de Willenborg pode atingir um nível significativo, determinando uma previsão teórica da vida em

fadiga menor do que a que deve ocorrer na prática, justificando assim a utilização do modelo de Willenborg modificado.

Com relação ao curto período de duração do termo de redução empregado no modelo de Willenborg modificado, analisando um espectro de carregamento concluímos, em virtude da sequência aleatória de cargas ocasionando os diversos efeitos de interação, que ele é suficiente para prever de maneira correta o efeito do retardo no crescimento da trinca numa sequência descendente de carregamento.

As conclusões extraídas da tabela 21 são extensivas às outras condições analisadas no trabalho, ou seja, para a relação  $\frac{K_{\text{máx S.c}}}{K_{\text{máx C.r}}}$  igual a 1,20, 1,27, 1,33 e 1,40 e comprimentos da trinca de 8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm.

#### 4.6 EFEITO DE CARGAS DE TRACÇÃO DE AMPLITUDE MENOR DO QUE AS ANTERIORES, APLICADAS APÓS A SEQUÊNCIA DESCENDENTE DE CARREGAMENTO, NA TAXA DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

Ocasionalmente, em carregamentos aleatórios, pode ocorrer uma carga significativa de tração ou compressão que é menor do que as cargas prévias anteriores, como pode ser observado na figura 79.

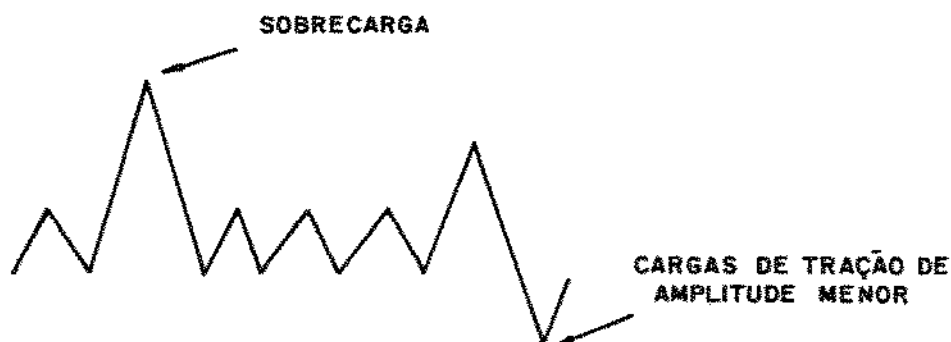


Figura 79 - Sequência do espectro de carregamento.

Estas cargas menores tem uma influência muito grande na história do carregamento, pois podem reduzir de maneira significativa o retardo no crescimento da fissura causado por uma sobrecarga anterior.

Para estudar o efeito das mesmas na taxa de propagação da trinca por fadiga, foi desenvolvido o Quinto Programa de Ensaio, cujos resultados serão comentados a seguir.

#### 4.6.1 Quinto Programa de Ensaio

Este Programa de Ensaio, realizado com o objetivo de se conhecer o efeito de cargas de tração de amplitude menor do que as cargas anteriores que ocorrem após a sequência descendente de carregamento, isto é, dentro da região de retardo no crescimento da fissura, é uma variação do Segundo Programa de Ensaio indicado na figura 80.

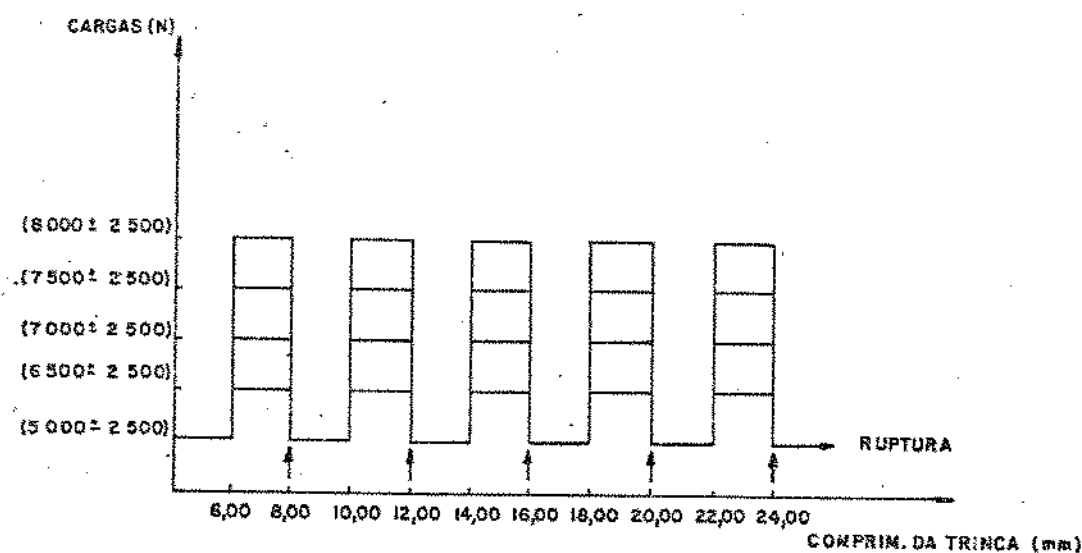


Figura 80 - Segundo Programa de Ensaio indicando as modificações para o Quinto Programa.

O efeito da presença de cargas de tração de amplitude menor do que as cargas anteriores após o ponto em que ocorre a sequência de carregamento alto-baixo, foram aplicadas nas amostras ensaiadas para 1 ciclo, 10 ciclos e 100 ciclos de cargas no valor de  $(4000 \pm 2500)N$ ,  $(3500 \pm 2500)N$  e  $(3000 \pm 2500)N$ , nos comprimentos de trinca de 8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm; ou seja, logo após o carregamento de sequência descendente.

Antes da apresentação e discussão dos resultados de vemos esclarecer que o Quinto Programa de Ensaaios foi idealizado a partir do Segundo Programa com a finalidade de se comparar os resultados de ambos e assim poder concluir com relação à influência do valor das cargas menores de tração e do número de ciclos aplicados.

Alguns dos resultados obtidos e que representam bem o comportamento geral observado, estão indicados nas figuras 81 a 84, nas quais estão representados para a relação  $\frac{K_{m\acute{a}x} S.c}{K_{m\acute{a}x} C.r}$  igual a 1,40 as informações obtidas no Segundo, Terceiro e Quinto Programa de Ensaaios, para os comprimentos da trinca de 8,00 mm, 12,00 mm, 16,00 mm, 20,00 mm e 24,00 mm, respectivamente.

A seguir faremos um resumo das principais informações obtidas com relação ao efeito das cargas menores de tração na taxa de propagação da trinca por fadiga.

a) Como pode ser observado na figura 81, a influência das mesmas é função do valor desta carga de tração aplicada logo após o ponto em que ocorreu o carregamento de sequência descendente. Quanto menor o valor da carga de tração, maior o seu efeito na diminuição do número de ciclos de retardo após o retorno da carga alta para a carga baixa.

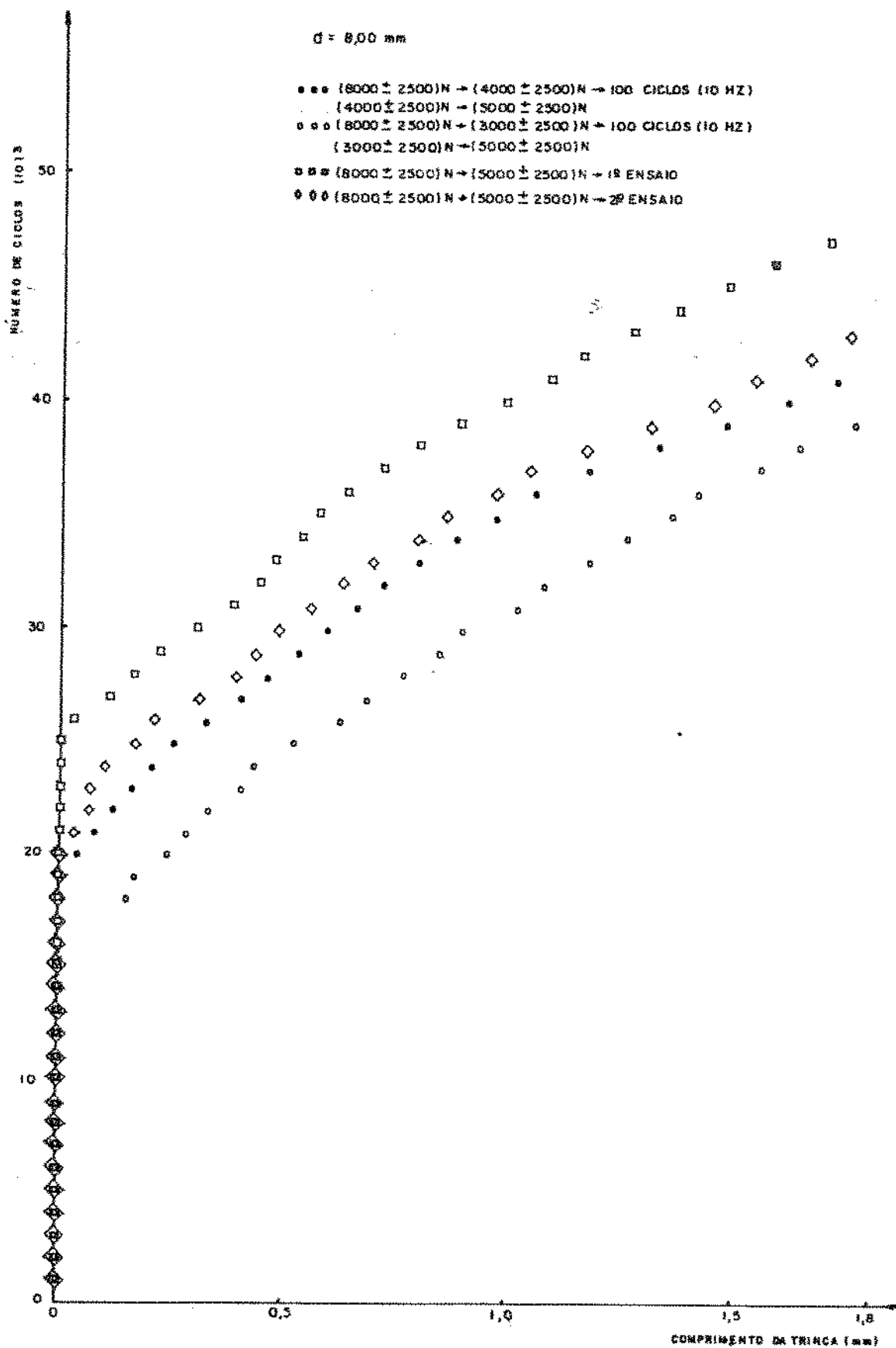


Figura 81 - Efeito de carga de tração na propagação da trinca.

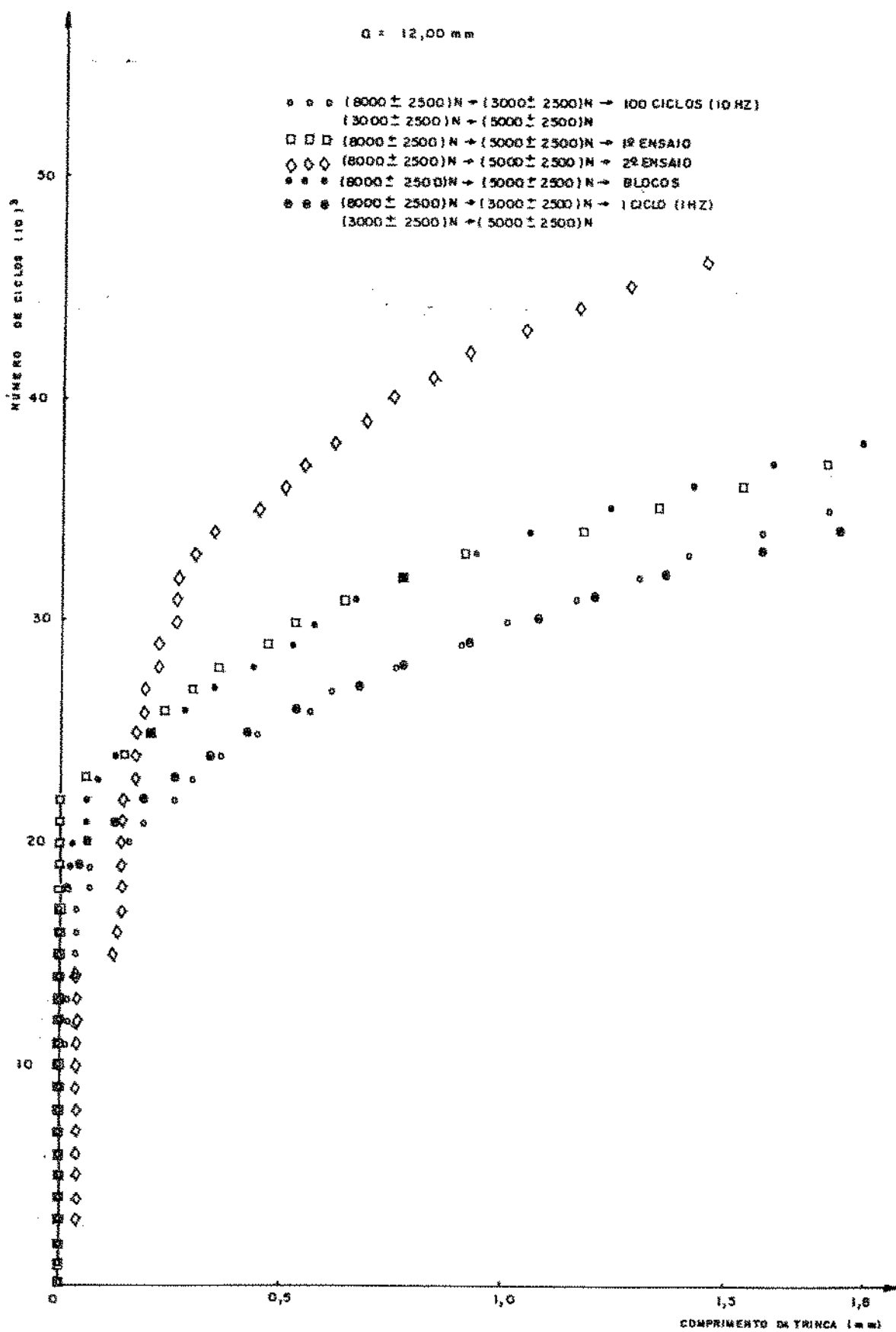


Figura 82 - Efeito de carga de tração na propagação da trinca.

$a = 16,00 \text{ mm}$

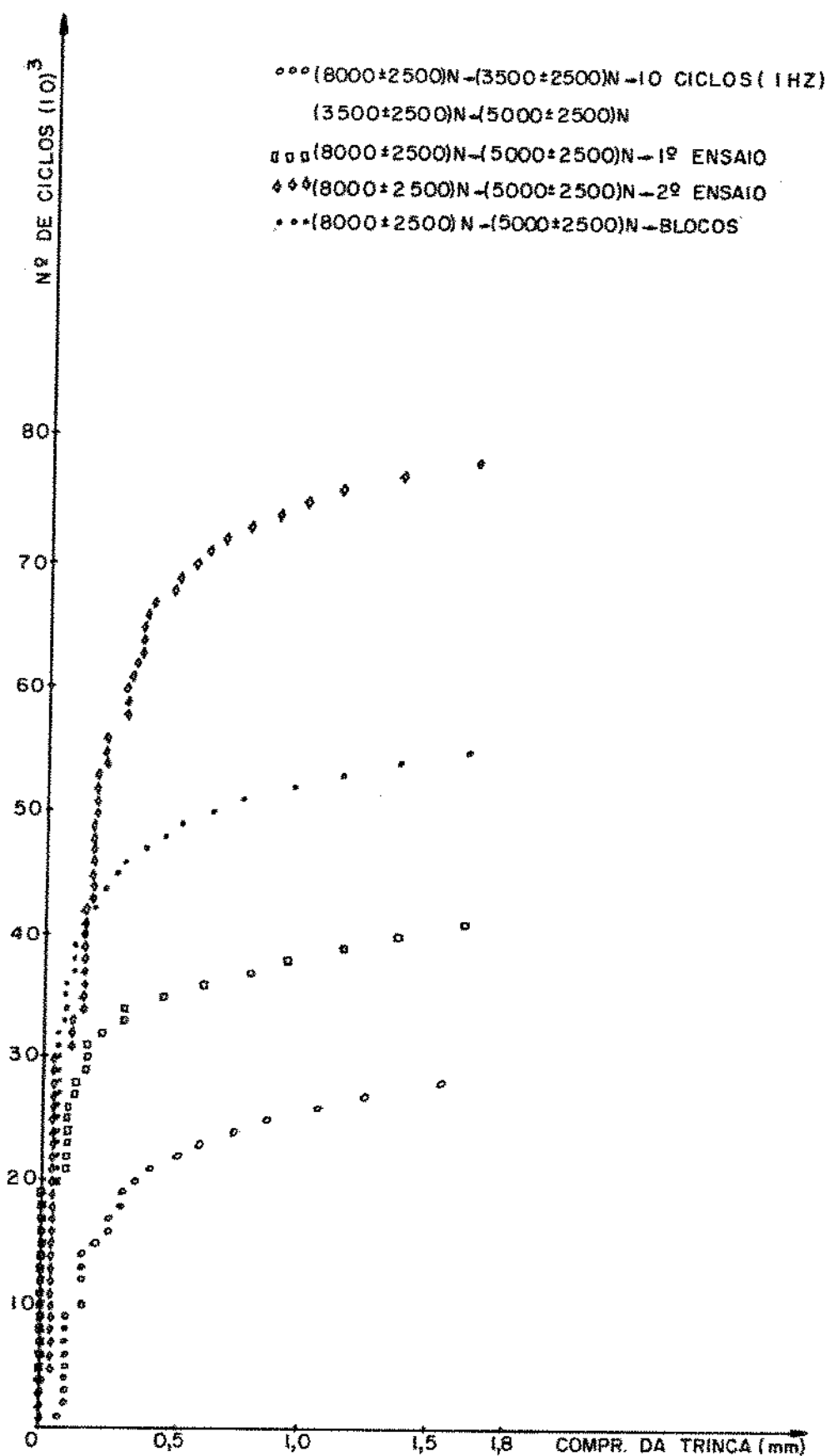


Figura 83 - Efeito de carga de tração na propagação da trinca.



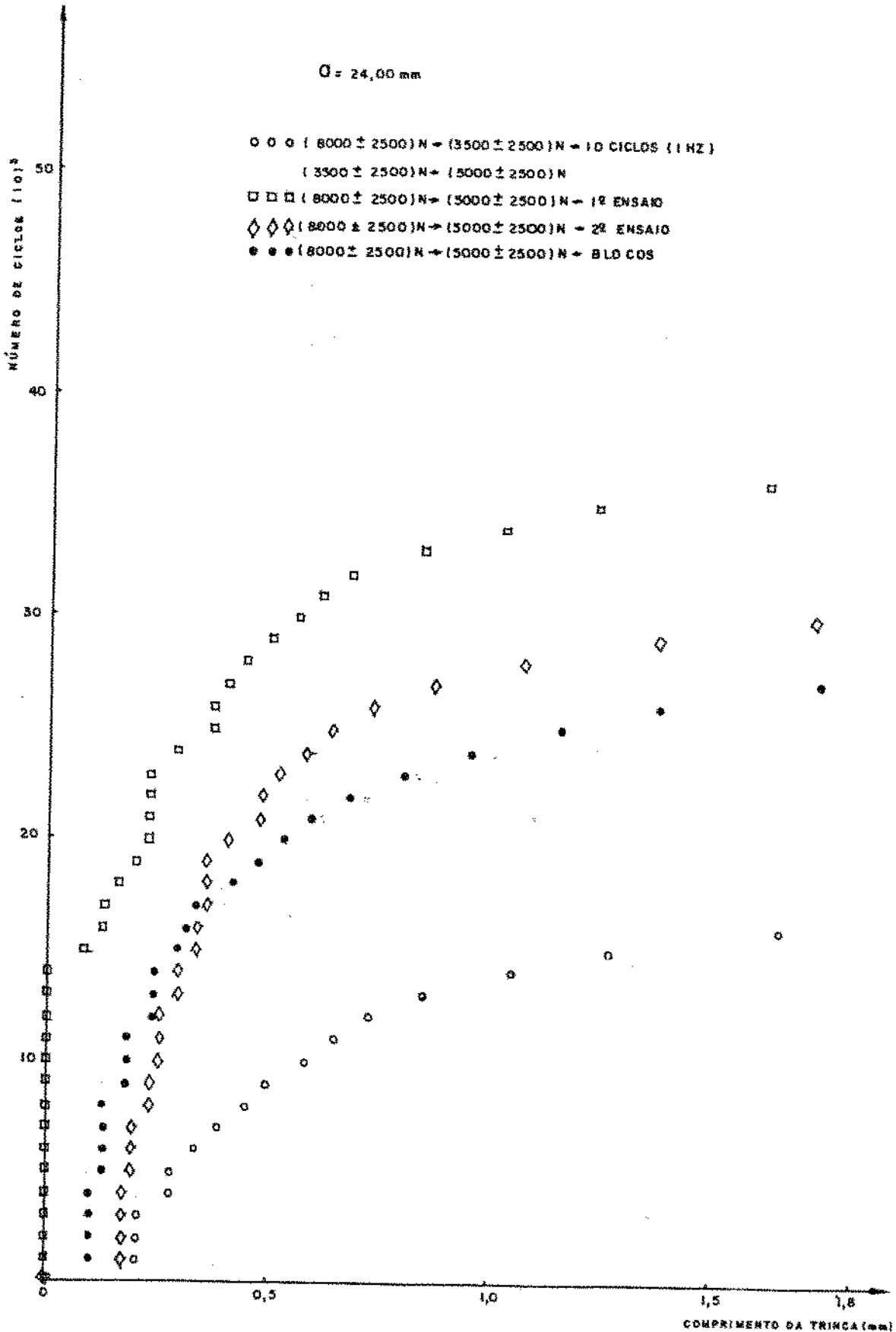


Figura 84 - Efeito de carga de tração na propagação da trinca.

Podemos verificar também na figura 81 que após o período de crescimento zero na trinca por fadiga, a propagação da mesma ocorre de maneira semelhante aos resultados do Segundo Programa de Ensaio; ou seja, a atuação da redução na carga se dá no número de ciclos de retardo, ND, que ocorre após o retorno da sobrecarga ao valor de referência. Não foi observado um crescimento da trinca logo após a aplicação da carga de tração.

b) Um outro resultado importante obtido com relação aos efeitos da carga de tração na propagação da trinca diz respeito ao número de ciclos da mesma aplicados. Na figura 82, estão indicados os resultados do 2º Programa. Para confirmar o comportamento observado no 2º Programa de Ensaio, considerou-se, adicionalmente, os resultados do 3º Programa representados na mesma figura 82, juntamente com as informações levantadas para duas análises no Quinto Programa, a saber: a aplicação de 1 ciclo na frequência de 1Hz de uma carga de tração no valor de  $(3000 \pm 2500)N$  e a aplicação de 100 ciclos na frequência de 10 Hz, do mesmo valor da carga de tração. Pode ser observado na figura 82 que os resultados destas análises são muito semelhantes, ocorrendo um crescimento inicial da trinca primeiramente na amostra ensaiada com um maior número de ciclos da carga de tração. Entretanto, os resultados não indicam claramente um grande efeito do número de ciclos de carregamento na subsequente propagação da fissura.

c) Com o objetivo de se analisar o efeito de mínimas cargas de tração na subsequente propagação da trinca, após o carregamento de sequência descendente, foram efetuadas uma série de ensaios nos quais simplesmente se desligou a máquina de ensaios durante o retardo na propagação da trinca resultante da

aplicação de sobrecargas. Os resultados podem ser observados na figura 85.

A carga de referência é de  $(9000 \pm 1500)N$  e a sobrecarga de  $(13500 \pm 1500)N$ . Nos pontos onde ocorreu o carregamento de seqüência ascendente, foram aplicados 50 ciclos na sobrecarga, na freqüência de 10Hz, a seguir se deu o retorno da mesma ao valor de referência e o ensaio prosseguiu na freqüência de 10Hz. Durante o período de crescimento zero da trinca por fadiga, a máquina de ensaio foi desligada e a seguir ligada novamente, para o prosseguimento do procedimento experimental. Em ambas as ocasiões, como está indicado na figura 85 observamos um imediato crescimento da trinca, indicando uma atuação sobre o retardo, com a conseqüente redução do mesmo. Um comportamento análogo deve ser esperado com a presença de cargas de compressão, o que nos alerta para a importância da presença das mesmas em espectros reais de carregamento, pois atuam no sentido de reduzir o número de ciclos de retardo no crescimento da trinca; ou seja, contra a segurança.

No entanto, nos diversos ensaios realizados objetivando conhecer a influência de cargas de tração de valor menor do que as anteriores, após uma seqüência de carregamento alto-baixo, as conclusões extraídas dos resultados obtidos indicam que num espectro real de cargas a que estruturas e componentes mecânicos estão normalmente submetidos em serviço, cargas de tração não tem uma influência tão sensível quanto seria o esperado. As informações experimentais mostram quase nenhum efeito para valores das mesmas próximos à carga de referência, no caso, a carga de  $(4000 \pm 2500)N$ , até um efeito mais sensível para menores valores de carga como por exemplo, para  $(3000 \pm 2500)N$ . No

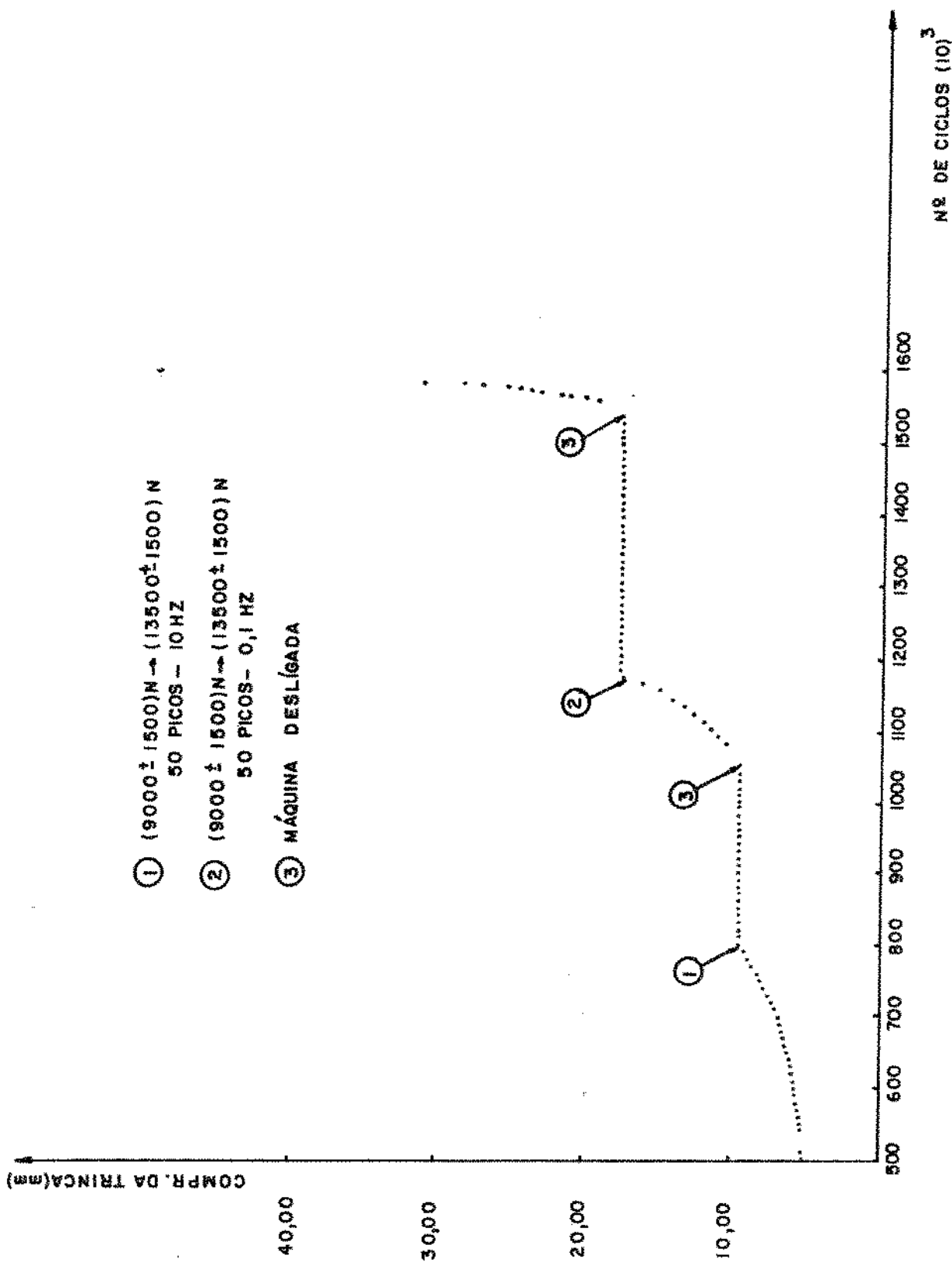


Figura 85 - Efeito de se desligar a máquina de ensaio durante o retardo no crescimento da fissura.

entanto, o que é importante de se observar é que o efeito das cargas de tração aplicadas logo após a seqüência descendente de carregamento não tem uma atuação imediata na taxa de propagação da trinca por fadiga, isto é, a fissura se comporta como se estas cargas não tivessem sido aplicadas (crescimento zero em alguns casos) e após um determinado número de ciclos de retardo, menor do que o existente nos carregamentos sem a presença das mesmas, se inicia a propagação da trinca por fadiga de maneira semelhante a que ocorre em carregamentos sem as cargas de tração.

Assim, concluindo os comentários com relação ao efeito das cargas de tração na taxa de propagação da trinca por fadiga, podemos afirmar que para as condições aplicadas no trabalho com o objetivo de se conhecer os efeitos de interação existentes em carregamentos de amplitude variável, as cargas de tração não devem se tornar um problema no que diz respeito à sua influência na diminuição do efeito do retardo no crescimento da fissura, pois isto só vai ocorrer após um certo número de ciclos na carga baixa e não imediatamente após a sua aplicação. Durante este intervalo de número de ciclos que devem ser aplicados na carga baixa para que o efeito das cargas de tração se torne aparente, num espectro real de carregamento uma série de efeitos de interação tais como aceleração e retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga já ocorreram em função da seqüência aleatória de cargas, mascarando, deste modo, o efeito da carga de tração anterior.

Podemos concluir então que a presença de cargas de tração de valor menor do que as anteriores após uma seqüência descendente de carregamento não deve influir no modelo de

Willenborg modificado que poderá ser usado para prever a taxa de crescimento da trinca por fadiga após a aplicação de sobrecargas de tração.

#### 4.7. COMENTÁRIOS GERAIS

##### 4.7.1 Considerações Iniciais

É importante salientar que o objetivo do trabalho é analisar e modelar os fenômenos de interação resultantes de carregamentos de amplitude não constante em chapas finas de uma liga de alumínio de alta resistência com ampla aplicação na indústria aeronáutica, em função da escassez de dados experimentais e informações teóricas com relação a este assunto.

Através dos Programas de Ensaio realizados, foi possível estudar e conhecer os principais efeitos de interação que podem ocorrer em um carregamento de amplitude variável, a saber: a aceleração e o retardo na taxa de propagação de uma trinca por fadiga resultantes, respectivamente, de carregamentos de sequência ascendente e descendente e os efeitos de cargas de tração aplicadas após a passagem de uma carga alta para uma baixa, no retardo do crescimento da trinca.

Não devemos imaginar, através dos resultados apresentados no trabalho, que a aceleração no crescimento da trinca resultante de um carregamento de sequência ascendente não tem importância na determinação da vida de uma determinada estrutura submetida a um carregamento qualquer e que deste modo o seu efeito comparado com o retardo na taxa de propagação da fissura é desprezível podendo, portanto, ser ignorado. Se esta conside

ração for feita estaremos, com certeza, trabalhando contra a segurança e assim comprometendo o sistema como um todo. Para o segundo e terceiro programas em particular, utilizados no estudo e modelamento dos efeitos de interação no crescimento da trinca, a aceleração em função da sua rápida estabilização parece realmente ter uma pequena influência na vida total da amostra comparativamente ao efeito do retardo cuja estabilização é mais demorada. Agora, se imaginarmos um espectro de carregamento com um número grande de seqüências ascendentes de carga, lembrando que ocorre um crescimento da trinca de duas a quatro vezes maior na passagem da carga baixa para a alta do que o mesmo no carregamento de amplitude constante na carga mais alta, veremos que o efeito da aceleração deve efetivamente ser considerado na determinação da vida residual da estrutura, se não quisermos assumir a responsabilidade de um provável colapso da mesma como resultado de uma vida sobre estimada.

O modelo proposto para representar a aceleração no crescimento da fissura e que considera a existência de um K acelerado na passagem da carga de referência para a sobrecarga, fornece resultados compatíveis com o fenômeno e análogos a informações obtidas por outros pesquisadores.

Com relação ao retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga resultante de um carregamento alto baixo, verificamos uma estabilização mais lenta do mesmo comparado ao efeito da aceleração no crescimento da fissura. A importância de se estudar e conhecer o fenômeno do retardo no desenvolvimento da trinca está no fato de que a vida do componente pode ser aumentada consideravelmente por este efeito ocorrendo, inclusive em alguns casos, para determinadas relações de  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$ , uma

parada total no crescimento da fissura.

O modelo de Willenborg modificado, desenvolvido para representar os resultados empíricos obtidos no trabalho, apresenta um bom comportamento quando comparado com os dados experimentais, até da ordem de algumas centenas de ciclos de aplicação da carga baixa após o ponto em que ocorreu o carregamento de sequência descendente, quando então, em função da própria concepção do modelo de Willenborg, a correção deixa de ser válida e os resultados teóricos se desviam dos obtidos experimentalmente.

Fazendo uma análise de espectros reais de carregamento a que estruturas normalmente estão solicitadas em serviço, verificamos que não ocorrem centenas de ciclos de aplicação de uma determinada carga após o ponto de passagem do carregamento alto para o baixo; na realidade sequências aleatórias de cargas induzem a presença quase que simultaneamente dos vários efeitos de interação existentes. Esta constatação nos leva a confiar no modelo de Willenborg modificado quanto à sua capacidade de prever o comprimento da trinca durante o efeito do retardo no crescimento da fissura.

O último efeito de interação estudado, que ocorre em carregamentos de amplitude variável como resultado da presença de uma carga de amplitude menor do que as outras existentes após o ponto de passagem da carga alta para a baixa, foi feito pela aplicação de cargas de tração imediatamente após o carregamento de sequência descendente.

Os resultados obtidos indicaram a influência destas cargas de tração no número de ciclos de retardo que se obtém em função da presença de sobrecargas, reduzindo-os quando comparado aos ensaios sem a presença das cargas de tração.



Curiosamente, não foi constatada a influência das cargas de tração, logo após a aplicação das mesmas, no crescimento da trinca por fadiga; isto só ocorrendo após um determinado número de ciclos na carga baixa, maior do que o limite de aplicação do modelo de Willenborg modificado. Este resultado indica que a presença destas cargas de tração dentro da zona plástica criada por uma sobrecarga não é relevante quanto à sua atuação no posterior crescimento da fissura, pois o desvio dos valores obtidos sem e com a presença das cargas de tração só ocorre após um elevado número de ciclos na carga de menor amplitude, o que foge completamente das características de um espectro real, de carregamento; além disso, este desvio é plenamente compensado pelo erro obtido na aplicação do modelo de Willenborg modificado, para um grande número de ciclos na carga baixa.

Conhecidos e estudados o comportamento dos três efeitos de interação que podem ocorrer em carregamentos aleatórios em uma chapa fina de alumínio de alta resistência, resta-nos apresentar o modelo final, que pode prever a vida de um determinado componente submetido a um espectro real de carregamento, o que será feito a seguir.

#### 4.7.2 Modelo Final

Na figura 86 está representado o diagrama de blocos do modelo final responsável pela determinação ciclo a ciclo do comprimento da trinca em programas de carregamento nos quais estão presentes os vários efeitos de interação.

No diagrama de blocos indicado na figura 86, os efeitos de interação a serem considerados pelo modelo são a acelera

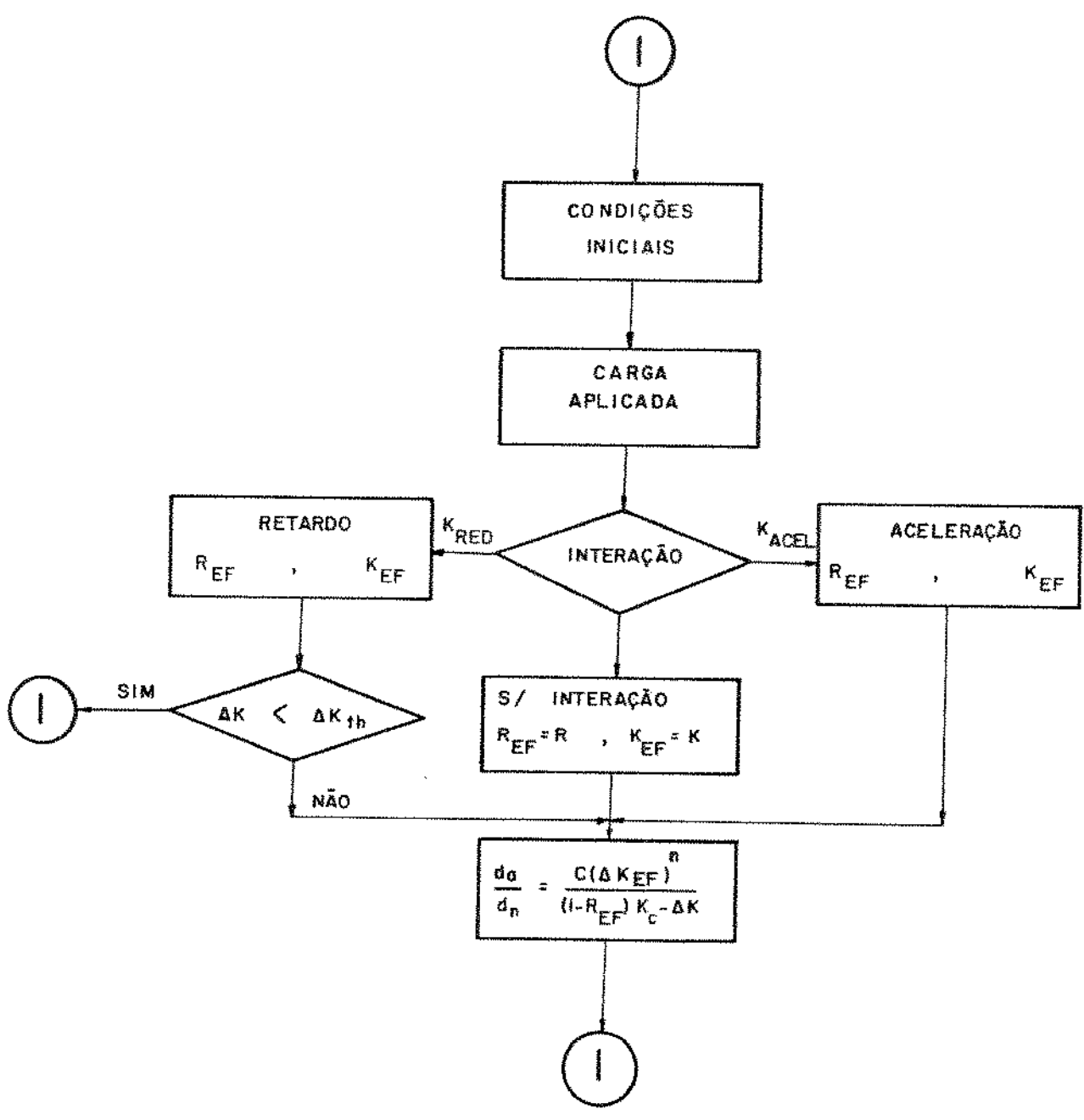


Figura 86 - Diagramas de blocos (simplificado), do modelo final.

ção e o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga resultantes, respectivamente, de carregamentos de seqüência ascendente e descendente.

Com relação à aceleração o termo  $K$  acelerado é o responsável, na equação de Forman, por uma taxa de crescimento maior do que seria a mesma sem a presença deste valor, representando desta maneira o comportamento observado. Quando o efeito de interação presente como resultado da seqüência de cargas é o retardo, o parâmetro  $K$  reduzido modificado ajusta os valores teóricos aos observados experimentalmente. Uma comparação do valor de  $\Delta K$  com o fator intensidade de tensão limite ( $\Delta K_{th}$ ) indica se naquele ciclo em particular haverá ou não o crescimento da fissura. A equação de Forman, que como vimos representa bem os dados empíricos obtidos nos carregamentos de amplitude constante é modificada e adaptada para cada um dos efeitos de interação.

Concluindo os comentários gerais, é interessante lembrar dos objetivos iniciais a serem alcançados com o desenvolvimento do trabalho, justificando assim a sua realização e compará-los com as informações e conclusões obtidas pela análise, interpretação dos resultados experimentais e consequentes modelos teóricos.

O objetivo básico do trabalho realizado era o conhecimento e modelamento teórico dos vários efeitos de interação presentes em carregamentos de amplitude variável, nos ensaios de propagação da trinca por fadiga, em uma chapa fina de uma liga de alumínio de alta resistência.

A justificativa do trabalho se deve a larga aplicação de chapas finas na indústria aeronáutica e a uma ausência de informações na literatura especializada com relação a este

assunto.

Através dos cinco programas de ensaio realizados, foi possível identificar e estudar os efeitos de interação presentes em carregamentos de amplitude variável, conhecidos como aceleração e retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga e a influência de cargas de tração aplicadas após a seqüência descendente de carregamento, na diminuição do retardo no crescimento da fissura.

A aceleração e o retardo no desenvolvimento da trinca foram devidamente modelados e a equação de Forman, que representa bem o comportamento do material quando solicitado a um carregamento de amplitude constante, consegue para cada um dos casos, representar bem o comportamento observado experimentalmente; o efeito de cargas de tração de amplitude menor do que as anteriores aplicadas após a seqüência descendente de carregamento não tem uma influência imediata na taxa de propagação da trinca por fadiga, mas sim após um determinado número de ciclos na carga baixa, não devendo, portanto, ser motivo de preocupação em espectros reais de carregamento. O modelo de Willenborg modificado empregado para representar o crescimento da trinca por fadiga em uma seqüência de carregamento alto-baixo, se torna extremamente não conservativo após um certo número de ciclos na carga de referência, fornecendo assim um comprimento da fissura teórico maior do que o observado experimentalmente, satisfazendo, portanto, o efeito da presença de uma possível carga de tração que possa reduzir a atuação do retardo na propagação da trinca.

O diagrama de blocos do modelo final dos efeitos de interação em carregamentos de amplitude variável, está apresen

tado na figura 86 . Fazer uma comparação dos resultados fornecidos pelo modelo final com os valores empíricos obtidos na realização dos Programas de Ensaio apresentados no trabalho, não será conclusivo com relação à eficiência ou não dos modelos teóricos desenvolvidos para representar a aceleração e o retardo no crescimento da fissura, uma vez que os Programas de Ensaio não representam espectros reais de carregamento a que estruturas estão solicitadas, para os quais os modelos foram obtidos.

Uma profunda análise comparativa dos resultados experimentais obtidos no trabalho e dos valores fornecidos pelos modelos elaborados indicam que os mesmos podem prever o comportamento da trinca por fadiga submetida a um espectro de cargas de forma bastante aproximada ao comportamento observado, tendo sido portanto plenamente atingidos os objetivos do trabalho.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Faremos a seguir uma síntese das principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do trabalho.

1) A equação de Forman, utilizada no trabalho, fornece valores teóricos para o comprimento da trinca bem próximos dos resultados experimentais obtidos em ensaios sob carregamento de amplitude constante sendo, portanto, aplicada nestes casos.

2) Em ensaios realizados sob carregamentos de amplitude variável, aparecem efeitos de interação responsáveis por uma taxa de crescimento da trinca por fadiga diferente da obtida

em carregamentos de amplitude constante. Estas diferenças são atribuídas a interações em  $\frac{da}{dN}$  quando a amplitude do carregamento cíclico é aumentada ou reduzida.

Os efeitos da seqüência de carregamento observados no posterior crescimento da trinca por fadiga foram: a aceleração e o retardo na propagação da fissura, em carregamentos de seqüência ascendente e descendente, respectivamente e a atuação de cargas de tração aplicadas após um carregamento de seqüência alto-baixo, na duração do retardo.

3) Foi observada uma rápida estabilização da aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga, comparativamente aos efeitos do retardo.

Dentro de certas restrições experimentais, foi constatado um maior crescimento da trinca por fadiga imediatamente após a seqüência ascendente de carregamento.

4) A presença do termo  $K \text{ acelerado} = K \text{ máx } S.c - K \text{ min } C.r$  quando introduzido na equação de Forman fornece taxas de crescimento seguindo o aumento na intensidade de tensão, de duas a quatro vezes maiores do que as taxas de crescimento em carregamento de amplitude constante, no nível mais alto, representando assim o comportamento real do material.

5) A intensidade do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga está diretamente associada à relação  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$

Para o material utilizado no desenvolvimento experimental do trabalho, o valor  $\frac{K \text{ máx } S.c}{K \text{ máx } C.r}$  igual a 1,20 indica o limite inferior a partir do qual se observa as interações em  $\frac{da}{dN}$  quando a amplitude do carregamento cíclico é reduzida. Para a

relação  $\frac{K_{\text{m\acute{a}x S.c}}}{K_{\text{m\acute{a}x C.r}}$  igual a 1,60 ocorre uma parada total no crescimento da fissura.

6) Um outro parâmetro responsável por uma maior ou menor intensidade do retardo na propagação da trinca por fadiga é o número de ciclos na carga alta, representada no trabalho pelo comprimento da trinca em que ocorre a seqüência descendente de carregamento.

7) Os resultados experimentais mostraram a existência de um número de ciclos ideal na carga alta, que propicia um máximo em termos de ganho no retardo do crescimento da trinca e que foi denominado de número de ciclos de saturação, NS, que para o material estudado ocorre na faixa de 4000 a 8000 ciclos.

8) O modelo de Willenborg desenvolvido para representar o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga, é extremamente não conservativo; isto é, os valores teóricos por ele fornecidos se afastam muito dos observados empiricamente, calculando comprimentos da fissura maiores do que os obtidos pelas condições experimentais do trabalho.

9) Três parâmetros foram considerados na modificação do modelo de Willenborg para aproximar os valores teóricos por ele fornecidos dos resultados experimentais, a saber: a relação  $\frac{K_{\text{m\acute{a}x S.c}}}{K_{\text{m\acute{a}x C.r}}$ , o número de ciclos na carga alta e o número de ciclos na carga baixa após a seqüência descendente de carregamento.

10) Foi obtido o termo K reduzido modificado = (K reduzido Willenborg).  $\alpha$ , onde  $\alpha$  é função dos parâmetros: a relação  $\frac{K_{\text{m\acute{a}x S.c}}}{K_{\text{m\acute{a}x C.r}}$ , o número de ciclos na carga alta e o número de

ciclos na carga baixa após a seqüência descendente de carregamento, que será o responsável pela maior aproximação entre os valores teóricos fornecidos pelo modelo de Willenborg e os resultados obtidos experimentalmente.

11) O modelo proposto que é uma modificação do modelo de Willenborg, permanece ativo durante um curto período de duração, porém suficiente para os espectros reais de carregamento, ajusta de uma maneira muito boa os valores teóricos aos dados experimentais, usufruindo deste modo dos benefícios, em termos de vida total do componente, resultantes do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga.

12) Cargas de tração de amplitude menor do que as anteriores aplicadas após a seqüência descendente de carregamento, são responsáveis por uma diminuição do número de ciclos de retardo que ocorrem após a seqüência de carregamento alto-baixo, comparativamente aos resultados sem a presença das mesmas. A atuação não ocorre imediatamente após a sua aplicação, mas sim após um certo número de ciclos na carga baixa, tornando-as assim não críticas em espectros reais de carregamento.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Serão feitas a seguir algumas sugestões para pesquisas a serem desenvolvidas na linha de atuação do trabalho apresentado.

1) Estudar o mecanismo de estabilização da aceleração na taxa de propagação da trinca por fadiga em carregamentos de seqüência ascendente.



2) Estudar o efeito do número de ciclos na carga alta no número de ciclos de retardo que ocorre em carregamentos de seqüência descendente.

3) Obter um novo modelo teórico que represente o retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga como resultado da seqüência alto-baixo em carregamentos de blocos.

4) Estudar o efeito de cargas de compressão aplicadas após a seqüência de carregamento alto-baixo no retardo da taxa de propagação da trinca por fadiga em chapas de alta resistência.

5) Para amostras submetidas a espectros reais de carregamento podemos, através dos modelos teóricos desenvolvidos no trabalho, determinar ciclo a ciclo o comportamento da trinca por fadiga e assim obter uma previsão teórica da vida do componente na presença de uma trinca por fadiga.

## B I B L I O G R A F I A

- |1| FROST, N.E., MARSH, K.J., POOK, L.P., Metal Fatigue, Clarendon Press, Oxford, 1974.
- |2| HORGER, O.J., "ASME Handbook: Metals Engineering Design", 2d ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1965.
- |3| MADAYAG, A.F., Metal Fatigue: Theory and Design, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- |4| VOORWALD, H.J.C., Análise sobre a Influência de Algumas Variáveis no Comportamento em Fadiga por Flexão Rotativa em Aços ABNT 4140 e ABNT 4340, Tese de Mestrado Apresentada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1983.
- |5| GASSNER, E. and SCHÜTZ, W., Fatigue Design Procedures, Proceedings of the 4 th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Munich, 16-18 June 1985, Pergamon Press.
- |6| BROEK, D., Elementary Engineering Fracture Mechanics Noordhoff International Publishing, Leyden, 1974.
- |7| KNOTT, J.F., Fundamentals of Fracture Mechanics, Butterworths, 1973.
- |8| ROLFE, S.T. and BARSOM, J.M., Fracture and Fatigue Control In Structures. Applications of Fracture Mechanics, Prentice-Hall, Inc., 1977.
- |9| KOCANDA, S., Fatigue Failure of Metals, Sijthoff & Noordhoff International Publishers, 1978.
- |10| RADON, J.C., CULVER, L.E., "Fatigue - Crack Propagation In Metals", Experimental Mechanics, março 1976.

- [11] SOCIE, D.F. and ARTWOHL, P.J., "Effect of Spectrum Editing on Fatigue Crack Initiation and Propagation In a Notched Member," Effect of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation And Propagation, ASTM STP 714, D.F. BRYAN And J.M. POTTER, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 3-23.
- [12] NELSON, D.V., "Review of Fatigue Crack Growth Prediction Methods", Experimental Mechanics, Fevereiro, 1977.
- [13] PARIS, P. and ERDOGAN, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Journal of Basic Engineering, Transactions ASME - Série D, Volume 85, 1963.
- [14] HOEPPNER, D.W., and KRUPP, W.E., "Prediction of Component Life By Application of Fatigue Crack Growth Knowledge", Engineering Fracture Mechanics, 6, 47, 1974.
- [15] THROOP, J.F., and MILLER, G.A., "Optimum Fatigue Crack Resistance", Achievement of High Fatigue Resistance In Metals and Alloys, ASTM STP, 154, 1970.
- [16] FORMAN, R.G., KEARNEY, V.E., and ENGLE, R.M., "Numerical Analysis of Crack Propagation In Cyclic Loaded Structures", Journal of Basic Engineering, setembro, 1967.
- [17] RITCHIE, R.O., "Near - Threshold Fatigue-Crack Propagation In Steels", International Metals Review 1979, nºs 5 e 6.
- [18] FINE, M.E., "Fatigue Resistance of Metals", Metallurgical Transactions A, volume 11A, pp 365-379, março 1980.

- |19| MILLER, M.S. and GALLAGHER, J.P., "An Analysis of Several Fatigue Crack Growth Rate (FCGR) Descriptions Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, ASTM STP 738, S.J. HUDAK, Jr. and R.J. BUCCI, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 205-251.
- |20| IRVING, P.E. and Mc Cartney, L.N., "Prediction of Fatigue Crack Growth Rates: Theory, Mechanisms, and Experimental Results", Contribution to "Fatigue 1977" Conference Hold at The University of Cambridge on 28-30 March, 1977.
- |21| SCHIJVE, J., "Fatigue Crack Propagation In Light Alloy Sheet Material and Structures", Report MP-195, National Aerospace Lab, The Netherlands, agosto, 1960.
- |22| SCHIJVE, J., "Four Lectures on Fatigue Crack Growth", Engineering Fracture Mechanics, vol. 11, pp. 167-221, 1979.
- |23| WOOD, H.A., "A Sumary of Crack Growth Prediction Techniques", Copy From Agard-LS-62, Agard Lecture Series n° 62.
- |24| HUDSON, C.M. and HARDRATH, H.F., "Effects of Changing Stress Amplitude on the Rate of Fatigue- Crack Propagation In Two Aluminum Alloys", National Aeronautics and Space Administration, Technical Note D-960.
- |25| WHEELER, O.E., "Spectrum Loading and Crack Growth", Journal of Basic Engineering, vol. 94, 1972.

- |26| RICE, R.C., and STEPHENS, R.I., "Overload Effects on Subcritical Crack Growth in Austenitic Manganese Steel", Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, 95, 1973.
- |27| BERNARD, P.J., LINDLEY, T.C., and RICHARDS, C.E., "Mechanics of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 78-97.
- |28| ADETIFA, D.A., GOWDA, C.U.B., and Topper, T.H., "A Model For Fatigue Crack Growth Delay Under Two-Level Block Loads", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 142-156.
- |29| VON EUW, E.F.J., HERTZBERG, R.W., and ROBERTS, R., "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation", Stress Analysis and Growth of Cracks, Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, Part I, ASTM STP 513, American Society For Testing and Materials, 1972, pp. 230-259.
- |30| TREBULES, V.M. Jr., ROBERTS, R., and HERTZBERG, R. W., "Effect of Multiple Overloads On Fatigue Crack Propagation in 2024-T3 Aluminum Alloy", Progress In Flaw Growth and Fracture Toughnes Testing, ASTM STP 536, American Society For Testing and Materials, 1973, pp. 115-146.

- |31| STEPHENS, R.I., CHEN, D.K., and HOM, B.W., "Fatigue Crack Growth With Negative Stress Ratio Following Single Overloads In 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 27-40.
- |32| ALZOS, W.X., SKAT, A.C., Jr., and HILLBERRY, B. M., "Effect of Single Overload/Underload Cycles on Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 41-60.
- |33| JACOBY, G.H., NOWACK, H., and VAN LIPZIG, H.T.M., "Experimental Results and a Hypothesis For Fatigue Crack Propagation Under Variable Amplitude Loading", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 172-183.
- |34| WEI, R.P., FENELLI, N.E., UNANGST, K.D., and SHIH, T.T., "Fatigue Crack Growth Response Following a High-Load Excursion In 2219-T851 Aluminum Alloy", Transactions of The ASME, volume 102, julho, 1980.
- |35| KNOTT, J.F. and PICKARD, A.C., "Effects of Overloads On Fatigue Crack Propagation: Aluminum Alloys", Contribution To "Fatigue 1977" Conference at The University of Cambridge, 28-30, março, 1977.
- |36| WEI, R.P., and SHIH, T.T., "Delay In Fatigue Crack Growth", International Journal of Fracture, vol. 10, nº 1, março 1974, pp. 77-85.

- [37] MC MILLAN, J.C., and PELLOUX, R.M.N., "Fatigue Crack Propagation Under Program and Random Loads, Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415, American Society For Testing Materials, 1967, pp. 505.
- [38] MATTHEWS, W.T., BARRATA, F.I., and DRISCOLL, G.W., "Experimental Observations of a Stress Intensity History Effect Upon Fatigue Crack Growth Rate", International Journal of Fracture Mechanics, 7 (2), 224, 1971.
- [39] FÜHRING, H. and SEEGER, T., "Acceleration and Retardation Effects With Fatigue Crack Growth and Their Calculation Based On Fatigue Fracture Mechanics", Technical University of Darmstadt, W. - Germany.
- [40] FÜHRING, H., "Practical Application of a Model For Fatigue Damage With Irregular Cyclic Loading", 5<sup>th</sup> International Conference On Fracture, Cannes, France, March, 1981.
- [41] ELBER, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure Damage Tolerance In Aircraft Structures, ASTM STP 486, American Society For Testing and Materials, 1971, pp. 230-242.
- [42] WILLENBORG, J., ENGLE, R.M., and WOOD, H.A., "A Crack Growth Retardation Model Using An Effective Stress Concept", Technical Memorandum 71-1-FBR, Janeiro, 1971.
- [43] BARSOM, J.M., "Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading IN ASTM A514-B STEEL", Progress In Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society For Testing and Materials, 1973, pp. 147-167.

- [44] BARSOM, J.M., Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 217-235.
- [45] SMITH, S.H., "Random-Loading Fatigue Crack Growth Behavior of Some Aluminum and Titanium Alloys", Structural Fatigue In Aircraft, ASTM STP 404, American Society For Testing and Materials, 1966, pp. 74.
- [46] BRUSSAT, T.R., "An Approach To Predicting The Growth To Failure of Fatigue Cracks Subjected To Arbitrary Uniaxial Cyclic Loading", Damage Tolerance In Aircraft Structures, ASTM STP 486, 122, 1971.
- [47] NELSON, D.V., and FUCHS, H.O., "Prediction of Fatigue Crack Growth Under Irregular Loading", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, 1976.
- [48] SCHIJVE, J. "Observations On The Prediction Of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable - Amplitude Loading", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 3-23.
- [49] BUCK, OTTO, FRANDSEN, J.D., and MARCUS, H.L., "Spike Overload and Humidity Effects on Fatigue Crack Delay in Al 7075-T651", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 101-112.
- [50] SHIH, T.T. and WEI, R.P., "Influences of Chemical and Thermal Environments On Delay In a Ti-6Al-4V Alloy", Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASIM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp.113-124.



- [51] HOPKINS, S.W., RAV, C.A., LEVERANT, G.R., and YUEN, A., "Effect of Various Programmed Overloads On The Threshold For High-Frequency Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, ASTM STP 595, American Society For Testing and Materials, 1976, pp. 125-141.
- [52] BUCCI, R.J., THAKKER, A.B., SANDERS, T.H., SAWTELL, R. R., and STALEY, J.T., "Ranking 7XXX Aluminum Alloy Fatigue Crack Growth Resistance Under Constant Amplitude and Spectrum Loading; Effect of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714 D.F. Bryan and J.M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 41-78.
- [53] MACHA, D.E., GRANDT, A.F., Jr., and WICKS, B.J., "Effects of Gas Turbine Engine Load Spectrum Variables On Crack Propagation", Effect of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D.F. Bryan and J. M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 108-127.
- [54] ABELKIS, P.R., "Effect of Transport Aircraft Wing Loads Spectrum Variation On Crack Growth", Effect of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D.F. Bryan and J.M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 143-169.
- [55] DE JONGE, J.B. and NEDERVEEN, A., "Effect of Gust Load Alleviation On Fatigue and Crack Growth In Alclad 2024-T3", Effect Of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D. F.

Bryan and J.M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 170-184.

- |56| DILL, H.D., SAFF, C.R., and POTTER, J.M., "Effects of Fighter Attack Spectrum On Crack Growth", Effect of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D.F. Bryan and J. M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 205-217.
- |57| LARSON, C.E., WHITE, D.J., and GRAY, T.D., "Evaluating Spectrum Effects In V.S. Air Force Attack/ Fighter/ Trainer Individual Aircraft Tracking, "Effect of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D.F. Bryan and J.M.Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 218-227.
- |58| HSU, T.M. and MC GEEN, W.M., "Effects Of Compressive Loads On Spectrum Fatigue Crack Growth Rate", Effect Of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D.F. Bryan and J. M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 79-90.
- |59| LARSEN, J.M. and ANNIS, C.G., Jr., "Observation of Crack Retardation Resulting From Load Sequencing Characteristic of Military Gas Turbine Operation", Effect Of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D.F. Bryan and J. M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 91-107.

- [60] WOZUMI, J.T., SPAMER, T., and G.E. LAMBERT,  
"An Engineering Model For Assessing Load Sequencing Effects", Effect Of Load Spectrum Variables On Fatigue Crack Initiation and Propagation, ASTM STP 714, D. F. Bryan and J.M. Potter, Eds., American Society For Testing and Materials, 1980, pp. 128-142.
- [61] TAIRA, S., TANAKA, K., and HOSHINA, M., "Grain Size Effect On Crack Nucleation and Growth In Long-Life Fatigue of Low-Carbon Steel", Fatigue Mechanisms, Proceedings of An ASTM-NBS-NSF Symposium, Kansas City, Mo., May 1978, J.T. Fong, Ed., ASTM STP 675, American Society For Testing and Materials, 1979, pp. 135-173.
- [62] SCARLIN, R.B., "Some Effects of Microstructure and Environment On Fatigue Crack Propagation", Fatigue Mechanisms, Proceedings of An ASTM-NBS-NSF Symposium, Kansas City, Mo., May 1978, J.T. Fong, Ed., ASTM STP 675, American Society For Testing and Materials, 1979, pp. 396-419.
- [63] SIMPKINS, D., NEULIEB, R.L., and GOLDEN, D.J., "Fatigue A Test Integrated Damage Modeling Approach" Journal Of Aircraft, Vol. 11, n<sup>o</sup> 9, September 1974, pp. 563 - 570.
- [64] CHANG, J.B., "Round-Robin Crack Growth Predictions On Center Cracked Tension Specimens Under Random Spectrum Loading", Methods and Models For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 3-40.

- [65] HUDSON, C.M., "A Root-Mean-Square Approach For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading", Methods and Models For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, J.B. Chang and C. M. Hudson, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 41-52.
- [66] NEWMAN, J.C., Jr., "A Crack-Closure Model For Predicting Fatigue Crack Growth Under Aircraft Spectrum Loading", Methods and Models For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 53-84.
- [67] JOHNSON, W.S., "Multi-Parameter Yield Zone Model For Predicting Spectrum Crack Growth", Methods and Models For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, J.B. Chang and C. M. Hudson, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 85-102.
- [68] RUDD, J. L. and Engle, R.M., Jr., "Crack Growth Behavior of Center-Cracked Panels Under Random Spectrum Loading", Methods and Models For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 103-114.

- |69| CHANG, J.B., SZAMOSSI, M., and LIU, K.W., "Random Spectrum Fatigue Crack Life Predictions With or Without Considering Load Interactions", Methods and Models For Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, ASTM STP 748, J. B. Chang and C. M. Hudson, Eds., American Society For Testing and Materials, 1981, pp. 115-132.
- |70| GROSS, B., SRAWLEY, J. E. and Brown, W.F., Jr., "Stress Intensity Factors For A Single-Edge-Notch Tension Specimen By Boundary Collocation Of A Stress Function", NASA, TN, D-2395, 1964.
- |71| PEREZ, O., "Fundamentos da Mecânica da Fratura - vols. I e II" - Publicação Interna - ITA.

APENDICE 1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PARA A OBTENÇÃO DOS  
POLINÔMIOS DE 6º GRAU.

APÊNDICE 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA DO MODELO DE  
WILLENBORG MODIFICADO.







APÊNDICE 3 - PARÂMETROS DAS CONSTANTES  $C$  e  $n$  DA EQUAÇÃO DE  
FORMAN OBTIDAS ATRAVÉS DE UM PROGRAMA DE REGRESS  
SÃO LINEAR.

REGRESSÃO MÚLTIPLA ... ESTUDO

SELEÇÃO ... 1

VARIÁVEL	MÉDIA	DESVIO	CORRELAÇÃO	COEFICIENTE	ERRO PADRÃO	VALOR T
Nº		PADRÃO	X VS Y	REGRESSÃO	COEF. REG.	COMPUTADO
2	15.5677	0.3245	0.8736	1.9240	0.1694	11.3568

DEPENDENTE

1 2.5699 0.7147

INTERCEPTO

-0.29306E+02

CORRELAÇÃO MÚLTIPLA

0.87366E+00

ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA

0.35209E+00

ANÁLISE DE VARIANCIA PARA A REGRESSÃO

FONTE DE VARIAÇÃO	GRAUS DE	SOMA DOS	MÉDIA	VALOR F
	LIBERDADE	QUADRADOS	QUADRADOS	
ATRIBUÍDOS A REGRESSÃO	1	0.15989E+02	0.15989E+02	0.12898E+03
RESIDUAL	40	0.49586E+01	0.12397E+00	
TOTAL	41	0.20947E+02		

REGRESSÃO MÚLTIPLA ... ESTUDO

SELEÇÃO ... 1

TABELA DE RESÍDUOS

CASO NO.	Y VALOR	Y ESTIMADO	RESIDUAL
1	0.13586E+01	0.17512E+01	0.10736E+00
2	0.17428E+01	0.20313E+01	-0.28853E+00
3	0.21771E+01	0.22915E+01	-0.11442E+00
4	0.26319E+01	0.25383E+01	0.93581E-01
5	0.29713E+01	0.27757E+01	0.19557E+00
6	0.31918E+01	0.30065E+01	0.18532E+00
7	0.33097E+01	0.32329E+01	0.76634E-01
8	0.33518E+01	0.34566E+01	-0.10480E+00
9	0.12141E+01	0.1405E+01	-0.22638E+00
10	0.13447E+01	0.17512E+01	-0.40659E+00
11	0.21065E+01	0.20313E+01	0.75241E-01
12	0.25883E+01	0.22915E+01	0.29680E+00
13	0.28933E+01	0.25383E+01	0.35499E+00
14	0.30620E+01	0.27757E+01	0.28630E+00
15	0.31323E+01	0.30065E+01	0.12586E+00
16	0.31406E+01	0.32329E+01	-0.92219E-01
17	0.31033E+01	0.34566E+01	-0.35328E+00
18	0.14716E+01	0.17512E+01	-0.27988E+00
19	0.14188E+01	0.20313E+01	-0.61249E+00
20	0.21746E+01	0.22915E+01	-0.11694E+00
21	0.26602E+01	0.25383E+01	0.12187E+00
22	0.29402E+01	0.27757E+01	0.16455E+00
23	0.30834E+01	0.30065E+01	0.76964E-01
24	0.31233E+01	0.32329E+01	-0.10951E+00
25	0.31067E+01	0.34566E+01	-0.34989E+00
26	0.26443E+01	0.17512E+01	0.89309E+00
27	0.11757E+01	0.20313E+01	-0.85557E+00
28	0.15005E+01	0.22915E+01	-0.79102E+00
29	0.24315E+01	0.25383E+01	-0.10644E+00
30	0.28980E+01	0.27757E+01	0.12227E+00
31	0.31845E+01	0.30065E+01	0.17803E+00
32	0.32706E+01	0.32329E+01	0.37739E-01
33	0.32641E+01	0.34566E+01	-0.19251E+00
34	0.10740E+01	0.10779E+01	-0.38835E-02
35	0.16489E+01	0.17512E+01	-0.10231E+00
36	0.24972E+01	0.20313E+01	0.46587E+00
37	0.28600E+01	0.22915E+01	0.56842E+00
38	0.30712E+01	0.25383E+01	0.53284E+00
39	0.31760E+01	0.27757E+01	0.40031E+00
40	0.32052E+01	0.30065E+01	0.19868E+00
41	0.31613E+01	0.32329E+01	-0.71591E-01
42	0.30764E+01	0.34566E+01	-0.38018E+00

Determinação das constantes C e n da equação de Forman:

O primeiro passo para a determinação das constantes C e n da equação de Forman, foi determinar as equações das curvas comprimento da trinca versus número de ciclos (a x N) para os carregamentos de amplitude constante. Assim, foram obtidos os polinômios de 6º grau, indicados na página 60, através de um programa cujo diagrama de blocos se encontra no Apêndice 1.

A seguir as funções que associam o comprimento da trinca com o número de ciclos da carga aplicada foram derivadas, apresentando os resultados indicados na página 61.

Utilizando o fator de correção de Gröss nos cálculos do fator intensidade de tensão para a geometria do corpo de prova empregado no desenvolvimento experimental do trabalho, ou seja,

$$K = \sigma \sqrt{a} \left| 1,99 - 0,41(a/w) + 18,70 (a/w)^2 - 38,48 (a/w)^3 + 53,85 (a/w)^4 \right|$$

Construímos as curvas  $\frac{da}{dN}$  versus  $\ln \Delta k$  para os valores de R a serem trabalhados, como pode ser observado na página 32.

Da equação de Forman :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta k)^n}{(1-R) K_C - \Delta k}$$

$$\frac{da}{dN} \left| (1-R) K_C - \Delta k \right| = C (\Delta k)^n$$

$$\ln \left| \frac{da}{dN} \left| (1-R) K_C - \Delta k \right| \right| = \ln \left| C (\Delta k)^n \right|$$

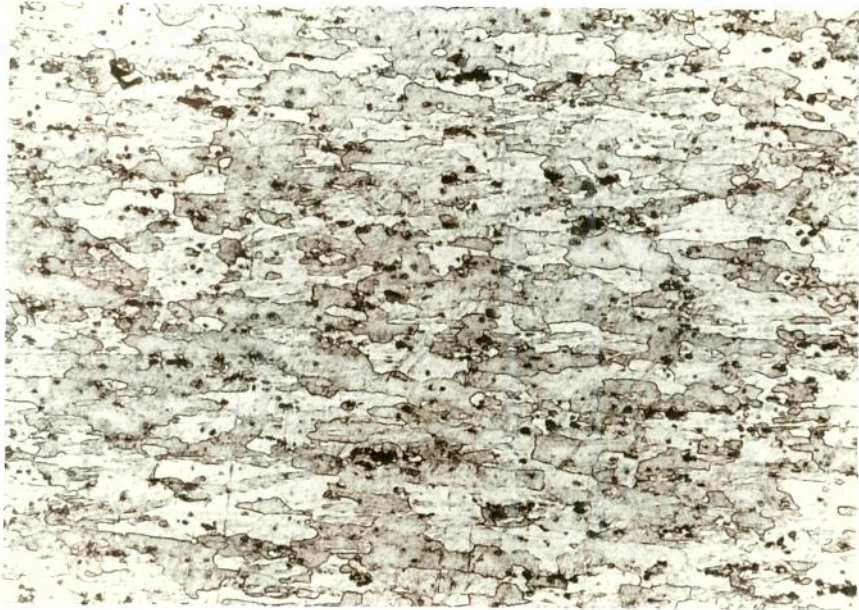
$$\ln \left| \frac{da}{dN} \left| (1-R) K_C - \Delta k \right| \right| = \ln c + n \ln (\Delta k)$$

que é a equação de uma reta.

Assim, através de um programa de Regressão Linear fo

ram determinadas as constantes C e n da equação de Forman, cujos parâmetros se encontram no Apêndice 3.

APENDICE 4 - MICROGRAFIAS CARACTERÍSTICAS DA LIGA 2024-T3.

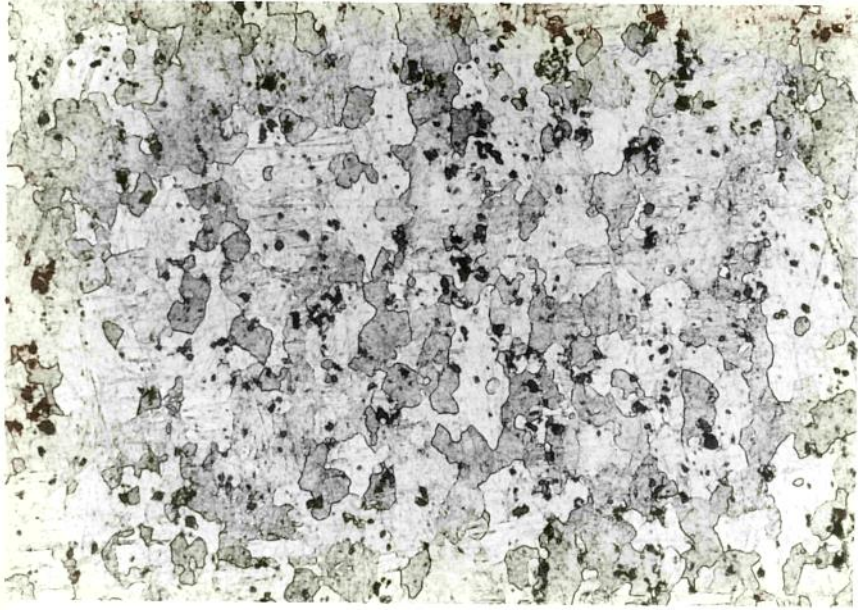


Liga 2024-T3 - T-S Aumento 150x. Reativo de Keller.

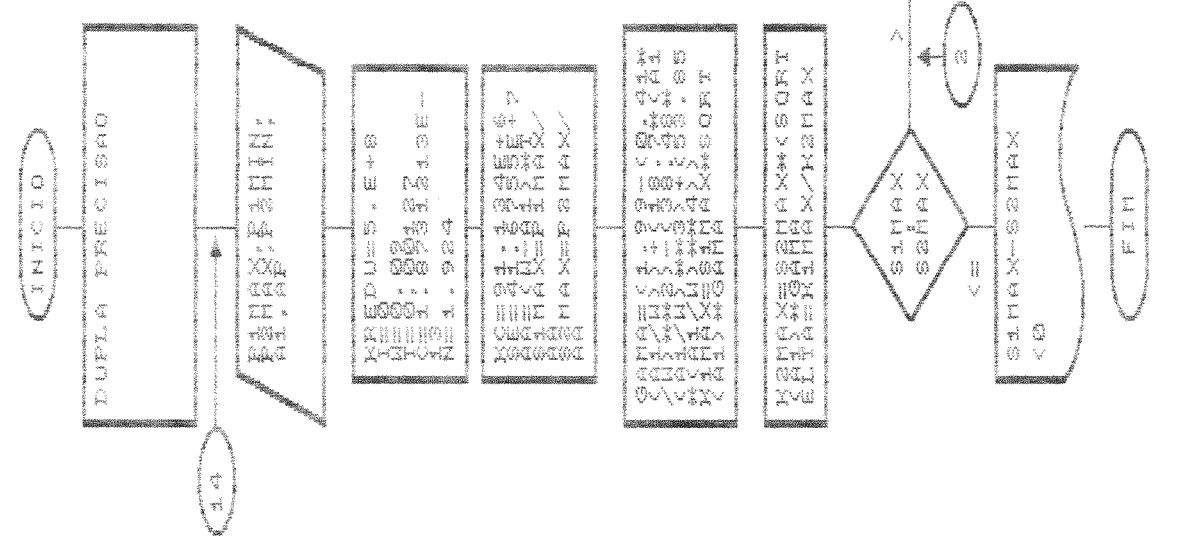
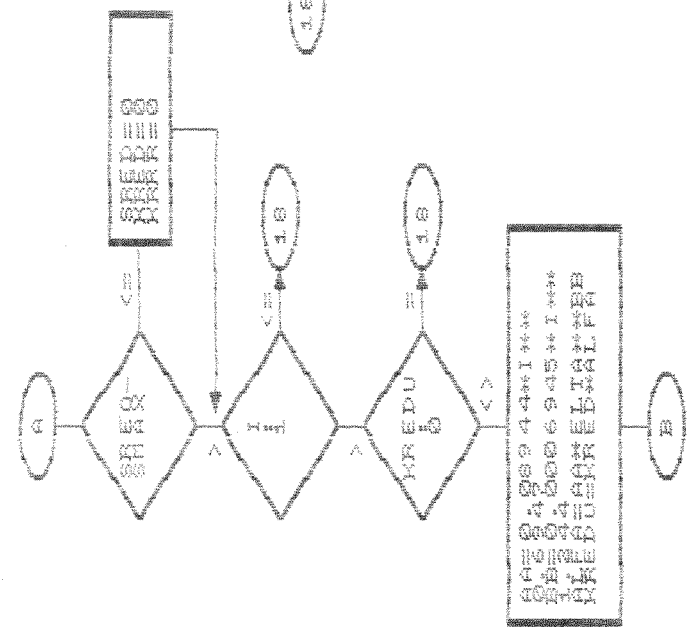
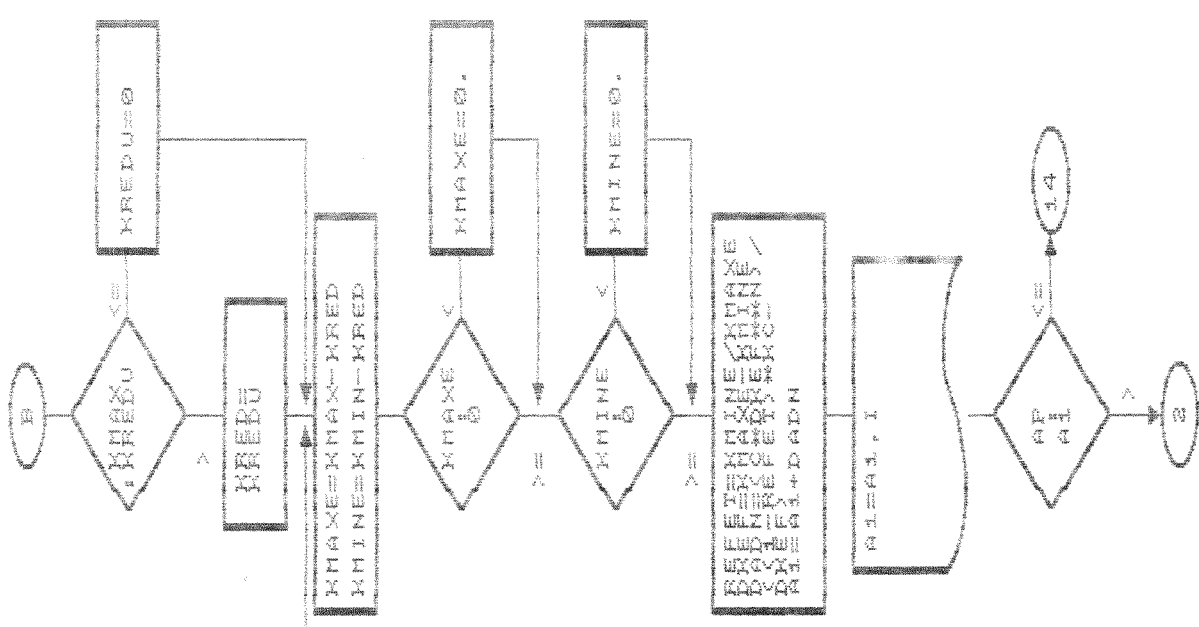


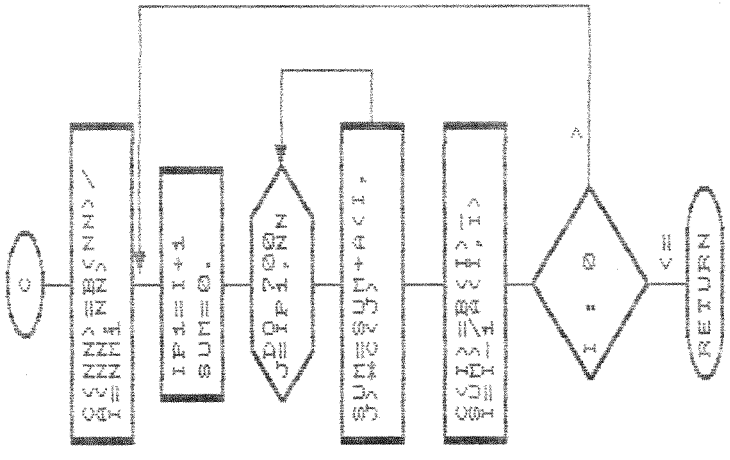
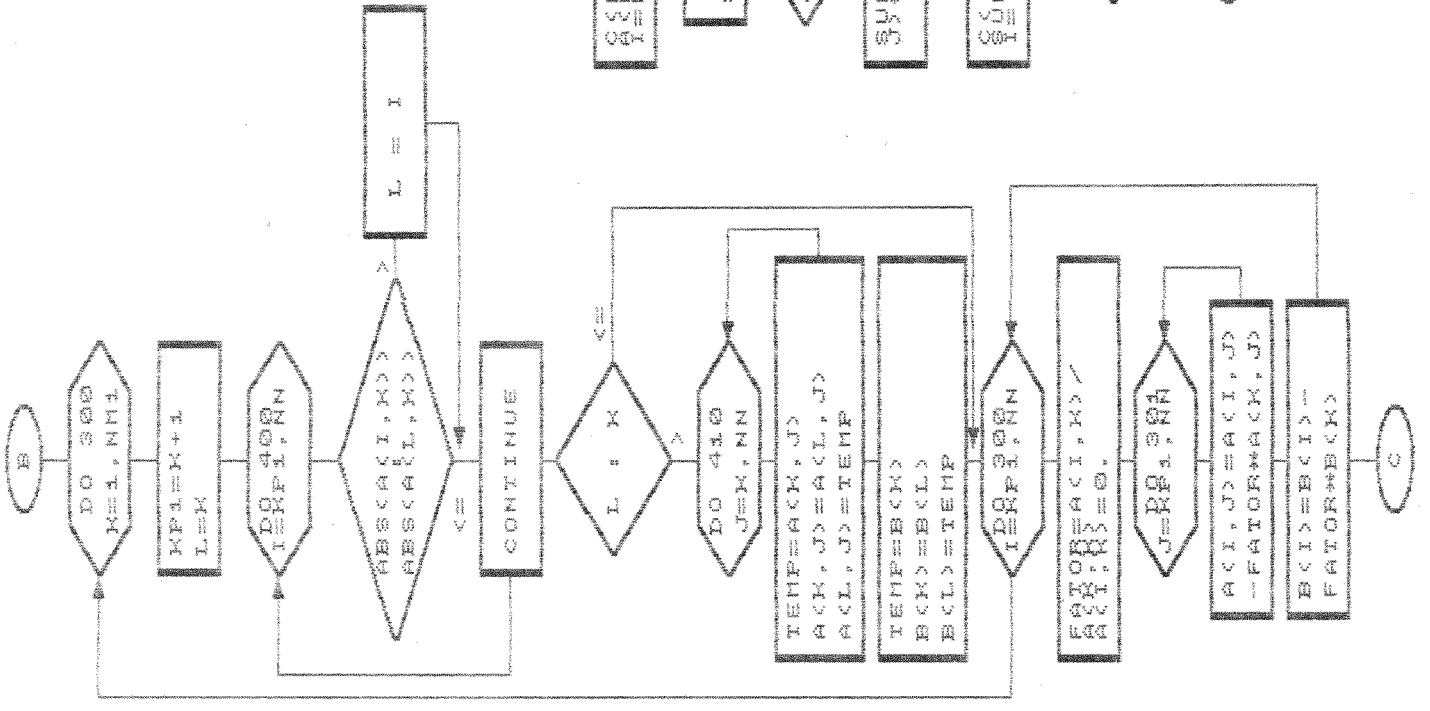
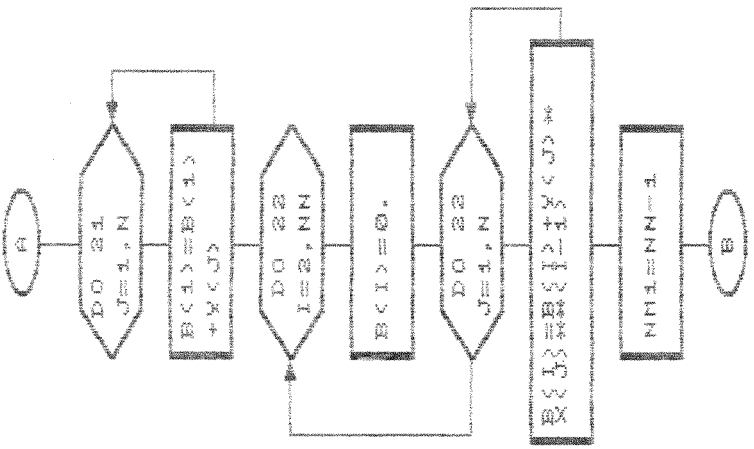
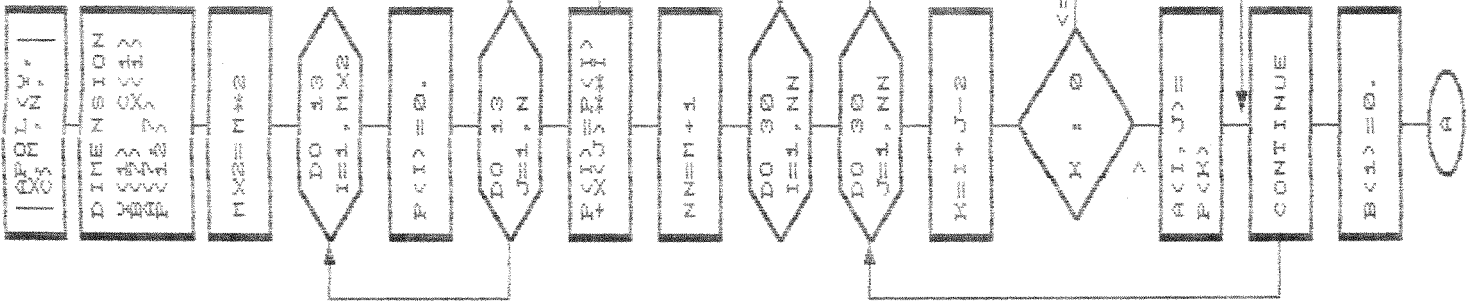
Liga 2024-T3 - L-S Aumento 150x. Reativo de Keller.





Liga 2024-T3 - T-L Aumento 150x. Reativo de Keller.





INICIO

DIMENSIONAMENTO  
X(1:100)  
X(1:100)

LER  
K, N

X(1) = 1  
I = 1: N

APR. COL. K, K.

K = 2

K = 5

X(1) + X(2) + X(3) + X(4) + X(5) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)

FIM

X(1) + X(2) + X(3) + X(4) + X(5) + X(6) + X(7) + X(8) + X(9) + X(10)

FIM

COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW  
COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW

SUM = 0

DO 110  
I = 1, N

IF (X(I) < 2) \* I +  
IF (Y(I) < 3) \* I +  
IF (Z(I) < 4) \* I +  
IF (U(I) < 5) \* I +  
IF (V(I) < 6) \* I +  
IF (W(I) < 7) \* I +  
IF (X(I) < 2) \* I +  
IF (Y(I) < 3) \* I +  
IF (Z(I) < 4) \* I +  
IF (U(I) < 5) \* I +  
IF (V(I) < 6) \* I +  
IF (W(I) < 7) \* I +

Y(I) = Y(I) +  
Z(I) = Z(I) +  
U(I) = U(I) +  
V(I) = V(I) +  
W(I) = W(I) +

FIM

COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW  
COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW

SUM = 0

DO 200  
I = 1, N

COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW  
COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW

Y(I) = Y(I) +  
Z(I) = Z(I) +

COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW  
COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW

SUM = 0

DO 120  
I = 1, N

COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW  
COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW

COX  
COY  
COZ  
COU  
COV  
COW

FIM