

UNESP  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

PROP. DE TRINCA POR FADIGA  
NA LIGA DE ALUMÍNIO 7475-T761  
SUB. A CARREG. DE AMPLITUDE  
CONST. E VARIÁVEL

Guaratinguetá  
1995



1110000280





***"Propagação de Trinca por  
Fadiga na Liga de Alumínio  
7475-T761 Submetida a  
Carregamentos de Amplitude  
Constante e Variável"***

***JOSÉ ANDRÉ MARIN DE CAMARGO***





UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Campus de Guaratinguetá

"PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA NA LIGA DE ALUMÍNIO 7475-T761  
SUBMETIDA A CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE CONSTANTE E VARIÁVEL"

*JOSÉ ANDRÉ MARIN DE CAMARGO*

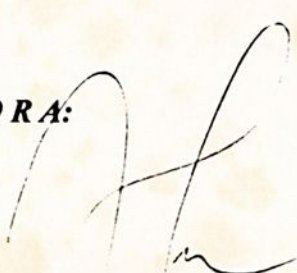
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

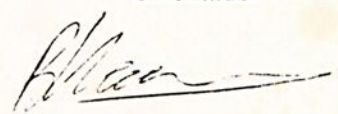
ESPECIALIDADE: MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

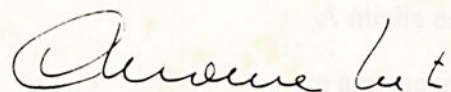
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Araújo Lima da Silva  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD  
Orientador

  
Prof. Dr. VIKTOR ALEXEEVICH PASTOUKHOV

  
Prof. Dr. CARLOS MOURA NETO

Novembro de 1995

FACULDADE DE ENGENHARIA  
DE GUARATINGUETA  
BIBLIOTECA

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte da vida.

Ao professor Herman Jacobus Cornelis Voorwald pela orientação deste trabalho.

Ao professor Viktor Alexeevich Pastoukhov pelo apoio na elaboração e desenvolvimento do trabalho.

Aos professores Carlos Antônio Reis, José Roberto Mendes Augusto Santos Torres e El Justino Ribeiro Barboza, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

A FDS - Embraer, em especial aos engenheiros Luis Fábio dos Santos Vieira e Breno M. Sodero Horta, pelo fornecimento do material para a confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios de tração e análise química do material.

Ao ITA pela cessão do equipamento para ensaios de fadiga, bem como ao eng. Julio César e ao técnico Marcos Vinicius de Oliveira Resende pela colaboração durante o desenvolvimento experimental.

Ao coordenador da Oficina Mecânica da FEG, professor José Rubens dos Santos e aos professores do DMF-FEG/UNESP, José Carlos dos Santos e Humberto Lopes Rodrigues, pela fabricação dos corpos de prova.

Aos meus pais.

À minha esposa Alba Valéria

e aos meus filhos,

Thiago e Thais.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte da vida.

Ao professor Herman Jacobus Cornelis Voorwald pela orientação deste trabalho.

Ao professor Viktor Alexeevich Pastoukhov pelo apoio na elaboração e desenvolvimento do trabalho.

Aos professores Carlos Antônio Reis Pereira Baptista, Marcelo Augusto Santos Torres e Miguel Justino Ribeiro Barboza, pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

À EDE - Embraer, em especial aos engenheiros Luís Fábio dos Santos Vieira e Breno Sávio M. Sodero Horta, pelo fornecimento do material para a confecção dos corpos de prova e pela realização dos ensaios de tração e análise química do material.

Ao ITA pela cessão do equipamento para ensaios de fadiga, bem como ao eng. Júlio César Santos e ao técnico Marcos Vinícius de Oliveira Resende pela colaboração durante o desenvolvimento experimental.

Ao coordenador da Oficina Mecânica da FEG, professor José Rubens dos Santos e aos técnicos do DMT-FEG/UNESP, José Carlos dos Santos e Humberto Lopes Rodrigues, pela confecção dos corpos de prova.

Ao Sr. Milton Cezar Marques (DPC - FEG/UNESP), pela confecção dos desenhos.

E a todas as pessoas que de uma forma indireta contribuíram para que este trabalho fosse realizado.



### 3- A PROPAGACÃO DE TRINCAS POR FADIGA: OBSERVAÇÕES

#### EXPERIMENTAIS E MODELAGEM..... 30

#### CONTEÚDO

|                                                                              |      |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.1- Introdução.....                                                         | 30   |
| 3.2- Fadiga com Carregamento de Amplitude Constante.....                     | 36   |
| 3.3- Fadiga com Carregamento de Amplitude Variável.....                      | 41   |
| 3.4- Modelos Representativos do Retardo na Taxa de Propagação da Trinca..... |      |
| Lista de Figuras.....                                                        | viii |
| Lista de Tabelas.....                                                        | xv   |
| Lista de Símbolos.....                                                       | xvi  |
| Resumo.....                                                                  | xix  |
| Abstract.....                                                                | xx   |

#### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... 62

#### 1- INTRODUÇÃO..... 1

##### 1.1- Considerações Gerais..... 1

##### 1.2- Objetivo do Trabalho..... 3

##### 1.2.1- Corpo de prova para o ensaio de fadiga..... 54

##### 1.3- Ensaios: Equipamentos Utilizados..... 66

#### 2- A FALHA POR FADIGA..... 5

##### 2.1- Introdução..... 5

##### 2.2- O Mecanismo de Falha por Fadiga..... 8

##### 2.2.1- A nucleação da trinca por fadiga..... 9

##### 2.2.2- O mecanismo da propagação da trinca em fadiga..... 11

##### 2.3- Elementos da Mecânica da Fratura Linear Elástica..... 15

##### 2.3.1- Modos geométricos da fratura..... 15

##### 2.3.2- Histórico..... 16

##### 2.3.3- Singularidade de tensão na ponta da trinca..... 18

##### 2.3.4- Hipóteses da mecânica da fratura linear elástica..... 24

##### 2.4- Determinação do Tamanho da Zona Plástica na Ponta da Trinca..... 25

##### 3.3- Segundo Programa de Ensaios..... 124





### 3- A PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA: OBSERVAÇÕES

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| EXPERIMENTAIS E MODELAGENS.....                                                            | 30 |
| 3.1- Introdução.....                                                                       | 30 |
| 3.2- Fadiga com Carregamento de Amplitude Constante.....                                   | 36 |
| 3.3- Fadiga com Carregamento de Amplitude Variável.....                                    | 41 |
| 3.4- Modelos Representativos do Retardo na Taxa de Propagação da Trinca<br>por Fadiga..... | 48 |
| 3.4.1- Modelo de Wheeler.....                                                              | 48 |
| 3.4.2- Modelo de Willenborg.....                                                           | 51 |
| 3.4.3- Modelo de Elber.....                                                                | 56 |
| 3.4.4- Outros métodos de análise.....                                                      | 59 |

### 4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....62

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1- Material.....                                                | 62 |
| 4.2- Corpos de Prova.....                                         | 63 |
| 4.2.1- Corpo de prova para o ensaio de tração.....                | 63 |
| 4.2.2- Corpo de prova para o ensaio de fadiga.....                | 64 |
| 4.3- Ensaio: Equipamentos Utilizados.....                         | 66 |
| 4.4- Carregamentos Usados $\Rightarrow$ ( regimes e cargas )..... | 68 |
| 4.4.1- Amplitude constante.....                                   | 68 |
| 4.4.2- Amplitude variável.....                                    | 68 |

### 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....69

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1- Programas de Trabalho.....                                                   | 69  |
| 5.2- Primeiro Programa de Ensaio.....                                             | 70  |
| 5.2.1- Primeiro programa de estudo: Tipo de equações cinéticas<br>de Paris.....   | 77  |
| 5.2.2- Segundo programa de estudo: O efeito da frequência do<br>carregamento..... | 117 |
| 5.3- Segundo Programa de Ensaio.....                                              | 124 |



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6- CONCLUSÕES.....                                                                                                          | 150 |
| 7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                                                                                    | 153 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                                             | 154 |
| Figura (2.2) - Microdeformação $\Rightarrow$ trinca de fadiga.....                                                          | 9   |
| Figura (2.4) - Estágios I - II - propagação de trinca.....                                                                  | 11  |
| Figura (2.5) - Superfície de fratura em fadiga.....                                                                         | 12  |
| Figura (2.6) - Esmagão de fadiga sobre trabalho a frio.....                                                                 | 13  |
| Figura (2.7) - Linhas de crescimento elípticas em um plano de tensão uniforme.....                                          | 14  |
| Figura (2.8) - Os três modos de fratura.....                                                                                | 15  |
| Figura (2.9) - As tensões na ponta da trinca.....                                                                           | 19  |
| Figura (2.10) - Tensão de fratura $\times$ espessura.....                                                                   | 23  |
| Figura (2.11) - Distribuição de tensões elásticas em $y$ para $\theta = 0$ .....                                            | 25  |
| Figura (2.12) - A primeira estimativa da zona plástica na ponta da trinca.....                                              | 26  |
| Figura (2.13) - A zona plástica de Irwin.....                                                                               | 27  |
| Figura (3.1) - Modelo de corpo de prova usado em ensaios de fadiga (tração-tração).....                                     | 32  |
| Figura (3.2) - Curvas representativas da propagação da trinca por fadiga.....                                               | 35  |
| Figura (3.3) - Taxa de propagação da trinca ( $da/dN$ ) versus fator intensidade de tensão cíclica ( $\Delta K_{II}$ )..... | 36  |
| Figura (3.4) - Mecanismo de fechamento da trinca por plasticidade.....                                                      | 40  |
| Figura (3.5) - Exemplo de carregamento cíclico aleatório.....                                                               | 42  |
| Figura (3.6) - Aceleração e retardo da propagação da trinca em fadiga com carregamento de amplitude variável.....           | 43  |
| Figura (3.7) - As diversas formas de manifestação do efeito do retardo induzido por sobrecarga.....                         | 45  |
| Figura (3.8) - Modelo de Wheeler para retardo.....                                                                          | 50  |
| Figura (3.9) - Modelo de Willenborg: carregamento e retardo.....                                                            | 51  |
| Figura (3.10) - Representação do $\Delta K_{II}$ para Willenborg.....                                                       | 54  |





## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura (2.1) - Parâmetros que caracterizam o ciclo de carregamento.....                                                        | 6  |
| Figura (2.2) - Microdeformação $\Rightarrow$ trinca de fadiga.....                                                             | 9  |
| Figura (2.3) - Modelo de Wood para a nucleação de trincas de fadiga.....                                                       | 11 |
| Figura (2.4) - Estágios I - II : propagação de trinca.....                                                                     | 11 |
| Figura (2.5) - Superfície de fratura em fadiga.....                                                                            | 12 |
| Figura (2.6) - Estrias de fadiga: cobre trabalhado a frio.....                                                                 | 13 |
| Figura (2.7) - Uma cavidade central elíptica em uma placa sob tensão uniforme $\sigma$ ...14                                   |    |
| Figura (2.8) - Os três modos de fratura.....                                                                                   | 15 |
| Figura (2.9) - As tensões na ponta da trinca.....                                                                              | 19 |
| Figura (2.10) - Tenacidade à fratura x espessura.....                                                                          | 23 |
| Figura (2.11) - Distribuição de tensões elásticas em y para $\theta = 0$ .....                                                 | 25 |
| Figura (2.12) - A primeira estimativa da zona plástica na ponta da trinca.....                                                 | 26 |
| Figura (2.13) - A zona plástica de Irwin.....                                                                                  | 27 |
| Figura (3.1) - Modelo de corpo de prova usado em ensaios de fadiga (tração-tração).32                                          |    |
| Figura (3.2) - Curvas representativas da propagação da trinca por fadiga.....                                                  | 35 |
| Figura (3.3) - Taxa de propagação da trinca ( $da/dN$ ) versus fator intensidade de<br>tensão cíclico ( $\Delta K_{th}$ )..... | 36 |
| Figura (3.4) - Mecanismo de fechamento da trinca por plasticidade.....                                                         | 40 |
| Figura (3.5) - Exemplo de carregamento cíclico aleatório.....                                                                  | 42 |
| Figura (3.6) - Aceleração e retardo da propagação da trinca em fadiga com<br>carregamento de amplitude variável.....           | 43 |
| Figura (3.7) - As diversas formas de manifestação do efeito do retardo induzido por<br>sobrecarga.....                         | 45 |
| Figura (3.8) - Modelo de Wheeler para retardo.....                                                                             | 50 |
| Figura (3.9) - Modelo de Willenborg: carregamento e retardo.....                                                               | 51 |
| Figura (3.10) - Representação do $\Delta K_{ef}$ , para Willenborg.....                                                        | 54 |



|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura (3.11) - Modelo de Elber - zona plástica na ponta da trinca.....                                                   | 56 |
| Figura (3.12) - Modelo de Elber - $\Delta K_{efetivo}$ .....                                                              | 57 |
| Figura (3.13) - Modelo de Elber - o fechamento da trinca e a variação de $\Delta K_{efetivo}$ ....                        | 58 |
| Figura (4.1) - Forma dos corpos de prova para tração.....                                                                 | 63 |
| Figura (4.2) - Códigos de orientação do plano da trinca.....                                                              | 64 |
| Figura (4.3) - Forma e dimensões do corpo de prova de fadiga.....                                                         | 65 |
| Figura (4.4) - Esquema da máquina de fadiga.....                                                                          | 67 |
| Figura (5.1) - Ensaio de amplitude constante - carga $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz.....                               | 73 |
| Figura (5.2) - Ensaio de amplitude constante - carga $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz.....                              | 73 |
| Figura (5.3) - Ensaio de amplitude constante - carga $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz.....                              | 74 |
| Figura (5.4) - Ensaio de amplitude constante - carga $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz....                              | 74 |
| Figura (5.5) - Ensaio de amplitude constante - carga $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz.....                              | 75 |
| Figura (5.6) - Ensaio de amplitude constante - carga $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz....                              | 75 |
| Figura (5.7) - Ensaio de amplitude constante - carga $(51,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz.....                              | 76 |
| Figura (5.8) - Ensaio de amplitude constante - carga $(51,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz....                              | 76 |
| Figura (5.9) - Ensaio de amplitude constante - carga $(15,0 \pm 5,0)$ kN e freq. = 90Hz.....                              | 77 |
| Figura (5.10) - Ensaio de amplitude constante - carga $(15,0 \pm 5,0)$ kN e freq. = 180Hz..                               | 77 |
| Figura (5.11) - Curvas a x N- $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz; $C_{ind.} = 3,0 E^{-10}$ e<br>$n_{ind.} = 1,92$ .....    | 84 |
| Figura (5.12) - Curvas a x N- $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz; $C_{ind.} = 6,42 E^{-10}$ e<br>$n_{ind.} = 1,56$ .....  | 84 |
| Figura (5.13) - Curvas a x N- $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz; $C_{ind.} = 3,12 E^{-10}$ e<br>$n_{ind.} = 2,14$ .....  | 85 |
| Figura (5.14) - Curvas a x N- $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz; $C_{ind.} = 8,23 E^{-10}$ e<br>$n_{ind.} = 1,70$ ..... | 85 |
| Figura (5.15) - Curvas a x N- $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 90Hz; $C_{ind.} = 1,20 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,90$ .....   | 86 |
| Figura (5.16) - Curvas a x N- $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq. = 180Hz; $C_{ind.} = 1,60 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,80$ .....  | 86 |





|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura (5.17) - Curvas a x N- ( $51,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{ind.} = 2,83 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,63$ .....   | 87 |
| Figura (5.18) - Curvas a x N- ( $51,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{ind.} = 2,44 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,80$ .....  | 87 |
| Figura (5.19) - Curvas a x N- ( $15,0 \pm 5,0$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{ind.} = 1,84 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,62$ .....   | 88 |
| Figura (5.20) - Curvas a x N- ( $15,0 \pm 5,0$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{ind.} = 1,84 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,62$ .....  | 88 |
| Figura (5.21) - Curvas a x N- ( $6,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{gen.} = 3,0 E^{-10}$ e<br>$n_{med.} = 1,74$ .....    | 90 |
| Figura (5.22) - Curvas a x N- ( $6,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{gen.} = 6,42 E^{-10}$ e<br>$n_{med.} = 1,74$ .....  | 90 |
| Figura (5.23) - Curvas a x N- ( $10,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{gen.} = 4,60 E^{-10}$ e<br>$n_{med.} = 1,92$ .....  | 91 |
| Figura (5.24) - Curvas a x N- ( $10,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{gen.} = 5,21 E^{-10}$ e<br>$n_{med.} = 1,92$ ..... | 91 |
| Figura (5.25) - Curvas a x N- ( $37,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{gen.} = 1,32 E^{-9}$ e<br>$n_{med.} = 1,85$ .....   | 92 |
| Figura (5.26) - Curvas a x N- ( $37,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{gen.} = 1,46 E^{-9}$ e<br>$n_{med.} = 1,85$ .....  | 92 |
| Figura (5.27) - Curvas a x N- ( $51,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{gen.} = 2,40 E^{-9}$ e<br>$n_{med.} = 1,72$ .....   | 93 |
| Figura (5.28) - Curvas a x N- ( $51,5 \pm 3,5$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{gen.} = 2,83 E^{-9}$ e<br>$n_{med.} = 1,72$ .....  | 93 |
| Figura (5.29) - Curvas a x N- ( $15,0 \pm 5,0$ )kN e freq.= 90Hz; $C_{gen.} = 1,83 E^{-9}$ e<br>$n_{med.} = 1,62$ .....   | 94 |
| Figura (5.30) - Curvas a x N- ( $15,0 \pm 5,0$ )kN e freq.= 180Hz; $C_{ind.} = 1,81 E^{-9}$ e<br>$n_{ind.} = 1,62$ .....  | 94 |



|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura (5.31) - Curvas a x N- $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 3,10 E^{-10}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,90$ .....                                                                      | 95  |
| Figura (5.32) - Curvas a x N- $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 4,79 E^{-10}$ e  |     |
| $n_{med.} = 1,90$ .....                                                                      | 95  |
| Figura (5.33) - Curvas a x N- $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,20 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,90$ .....                                                                      | 96  |
| Figura (5.34) - Curvas a x N- $(51,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,69 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,90$ .....                                                                      | 96  |
| Figura (5.35) - Curvas a x N- $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 4,82 E^{-10}$ e  |     |
| $n_{med.} = 1,72$ .....                                                                      | 97  |
| Figura (5.36) - Curvas a x N- $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 7,96 E^{-10}$ e |     |
| $n_{med.} = 1,72$ .....                                                                      | 97  |
| Figura (5.37) - Curvas a x N- $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 1,87 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med.} = 1,72$ .....                                                                      | 98  |
| Figura (5.38) - Curvas a x N- $(51,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 2,83 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med.} = 1,72$ .....                                                                      | 98  |
| Figura (5.39) - Curvas a x N- $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 3,43 E^{-10}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,84$ .....                                                                      | 99  |
| Figura (5.40) - Curvas a x N- $(10,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 5,28 E^{-10}$ e  |     |
| $n_{med.} = 1,84$ .....                                                                      | 99  |
| Figura (5.41) - Curvas a x N- $(37,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,34 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,84$ .....                                                                      | 100 |
| Figura (5.42) - Curvas a x N- $(51,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,88 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,84$ .....                                                                      | 100 |
| Figura (5.43) - Curvas a x N- $(15,0 \pm 5,0)$ kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,10 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med.} = 1,84$ .....                                                                      | 101 |
| Figura (5.44) - Curvas a x N- $(6,5 \pm 3,5)$ kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 4,99 E^{-10}$ e  |     |
| $n_{med.} = 1,70$ .....                                                                      | 102 |





|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura (5.45) - Curvas a x N- (10,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 8,27 E^{-10}$ e |     |
| $n_{med} = 1,70$ .....                                                                | 102 |
| Figura (5.46) - Curvas a x N- (37,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 1,94 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,70$ .....                                                                | 103 |
| Figura (5.47) - Curvas a x N- (51,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 2,93 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,70$ .....                                                                | 103 |
| Figura (5.48) - Curvas a x N- (15,0±5,0)kN e freq.= 180Hz; $C_{ind} = 1,53 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{ind} = 1,70$ .....                                                                | 104 |
| Figura (5.49) - Curvas a x N- (6,5±3,5)kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 3,91 E^{-10}$ e   |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 105 |
| Figura (5.50) - Curvas a x N- (6,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 4,37 E^{-10}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 105 |
| Figura (5.51) - Curvas a x N- (10,5±3,5)kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 6,00 E^{-10}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 106 |
| Figura (5.52) - Curvas a x N- (10,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 7,13 E^{-10}$ e |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 106 |
| Figura (5.53) - Curvas a x N- (37,5±3,5)kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,54 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 107 |
| Figura (5.54) - Curvas a x N- (37,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 1,70 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 107 |
| Figura (5.55) - Curvas a x N- (51,5±3,5)kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 2,17 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 108 |
| Figura (5.56) - Curvas a x N- (51,5±3,5)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 2,58 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 108 |
| Figura (5.57) - Curvas a x N- (15,0±5,0)kN e freq.= 90Hz; $C_{gen} = 1,30 E^{-9}$ e   |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 109 |
| Figura (5.58) - Curvas a x N- (15,0±5,0)kN e freq.= 180Hz; $C_{gen} = 1,31 E^{-9}$ e  |     |
| $n_{med} = 1,77$ .....                                                                | 109 |



|                                                                                                                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura (5.59) - Curva C x razão de carga (R) para a frequência de 90 Hz.....                                                                                            | 115  |
| Figura (5.60) - Curva C x razão de carga (R) para a frequência de 180Hz.....                                                                                            | 115  |
| Figura (5.61) - Curvas C x razão de carga (R) para $n_{med.} = 1,90$ (90Hz) e<br>$n_{med.} = 1,72$ (180Hz).....                                                         | 116  |
| Figura (5.62) - Curvas C x razão de carga (R) para $n_{med.} = 1,81$ ( 90 Hz e 180 Hz)...                                                                               | 116  |
| Figura (5.63) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento constante ( $6,5 \pm 3,5$ ) kN e frequência<br>variável (90 Hz e 180 Hz).....                                   | 2117 |
| Figura (5.64) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento constante ( $10,5 \pm 3,5$ ) kN e frequência<br>variável (90 Hz e 180 Hz).....                                  | 118  |
| Figura (5.65) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento constante ( $37,5 \pm 3,5$ ) kN e frequência<br>variável (90 Hz e 180 Hz).....                                  | 118  |
| Figura (5.66) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento constante ( $51,5 \pm 3,5$ ) kN e frequência<br>variável (90 Hz e 180 Hz).....                                  | 119  |
| Figura (5.67) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento constante ( $15,0 \pm 5,0$ ) kN e frequência<br>variável (90 Hz e 180 Hz).....                                  | 119  |
| Figura (5.68) - Curvas a x N $\Rightarrow$ amplitude constante; carregamentos e frequência<br>variáveis (90 Hz e 180 Hz).....                                           | 120  |
| Figura (5.69) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com 1 pico de<br>sobrecarga para $R_{sc.} = 1,4$ .....                                    | 126  |
| Figura (5.70) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com 1 pico de<br>sobrecarga para $R_{sc.} = 1,8$ .....                                    | 127  |
| Figura (5.71) - Curvas a x N $\Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com 1 pico de<br>sobrecarga para $R_{sc.} = 2,0$ .....                                    | 127  |
| Figura (5.72) - Curvas a x N $\Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ 1 pico de sobrecarga $\Rightarrow R_{sc.} = 1,4$ (D),<br>$R_{sc.} = 1,8$ (G), $R_{sc.} = 2,0$ (H)..... | 128  |
| Figura (5.73) - Curvas a x N $\Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ 1 pico de sobrecarga $\Rightarrow R_{sc.} = 1,4$ .....                                                 | 129  |
| Figura (5.74) - Curvas a x N $\Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ 1 pico de sobrecarga $\Rightarrow R_{sc.} = 1,8$ .....                                                 | 131  |
| Figura (5.75) - Curvas a x N $\Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ 1 pico de sobrecarga $\Rightarrow R_{sc.} = 2,0$ .....                                                 | 132  |





## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura (5.76) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ blocos sobrecarga $\Rightarrow R_{sc} = 1,2$ .....              | 135 |
| Figura (5.77) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ blocos sobrecarga $\Rightarrow R_{sc} = 1,4$ .....              | 135 |
| Figura (5.78) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ blocos sobrecarga $\Rightarrow R_{sc} = 1,6$ .....              | 136 |
| Figura (5.79) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ blocos sobrecarga $\Rightarrow R_{sc} = 1,8$ .....              | 136 |
| Figura (5.80) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ retardo $\Rightarrow$ blocos sobrecarga $\Rightarrow R_{sc} = 2,0$ .....              | 137 |
| Figura (5.81) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para $R_{sc} = 1,2$ ..... | 139 |
| Figura (5.82) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para $R_{sc} = 1,4$ ..... | 142 |
| Figura (5.83) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para $R_{sc} = 1,6$ ..... | 144 |
| Figura (5.84) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para $R_{sc} = 1,8$ ..... | 146 |
| Figura (5.85) - Curvas $a \times N \Rightarrow$ carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para $R_{sc} = 2,0$ ..... | 148 |
| Tabela (5.7) - Valores de $C_{pm}$ e $n_{pm}$ $\Rightarrow$ carregamento variável e frequência (90 Hz) constante.....                 | 82  |
| Tabela (5.8) - Valores de $C_{pm}$ e $n_{pm}$ $\Rightarrow$ carregamento variável e frequência (180 Hz) constante.....                | 83  |
| Tabela (5.9) - Valores de $C_{pm}$ e $n_{pm}$ $\Rightarrow$ carregamento e frequência variáveis.....                                  | 83  |
| Tabela (5.10) - Valores de $n_{pm}$ $\Rightarrow$ carregamento constante e frequência variável.....                                   | 89  |
| Tabela (5.11) - Efeito da frequência de carregamento sobre a taxa de crescimento da trilha.....                                       | 121 |
| Tabela (5.12) - Efeito do retardo para picos de sobrecarga.....                                                                       | 130 |
| Tabela (5.13) - Efeito do retardo para blocos de sobrecarga.....                                                                      | 134 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela (4.1) - Composição química da liga Al 7475-T761.....                                                                              | 62  |
| Tabela (4.2) - Dimensões dos corpos de prova para tração.....                                                                            | 63  |
| Tabela (4.3) - Propriedades mecânicas da liga Al 7475-T761.....                                                                          | 64  |
| Tabela (5.1) - Número de ciclos até a fratura dos corpos de prova para<br>carregamento constante.....                                    | 71  |
| Tabela (5.2) - Valores de $C_{ind.}$ e $n_{ind.} \Rightarrow$ frequência de 90 Hz.....                                                   | 79  |
| Tabela (5.3) - Valores de $C_{ind.}$ e $n_{ind.} \Rightarrow$ frequência de 180 Hz.....                                                  | 79  |
| Tabela (5.4) - Valores de $C_{gen.}$ e $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento constante e frequência do<br>carregamento variável.....      | 81  |
| Tabela (5.5) - Valores de $C_{gen.}$ e $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento variável, amplitude e<br>frequência (90 Hz) constantes.....  | 81  |
| Tabela (5.6) - Valores de $C_{gen.}$ e $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento variável, amplitude e<br>frequência (180 Hz) constantes..... | 82  |
| Tabela (5.7) - Valores de $C_{gen.}$ e $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento variável e frequência<br>(90 Hz) constante.....              | 82  |
| Tabela (5.8) - Valores de $C_{gen.}$ e $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento variável e frequência<br>(180 Hz) constante.....             | 83  |
| Tabela (5.9) - Valores de $C_{gen.}$ e $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento e frequência variáveis.....                                  | 83  |
| Tabela (5.10) - Valores de $n_{medio} \Rightarrow$ carregamento constante e frequência variável.....                                     | 89  |
| Tabela (5.11) - Efeito da frequência de carregamento sobre a taxa de crescimento da<br>trinca.....                                       | 121 |
| Tabela (5.12) - Efeito do retardo para picos de sobrecarga.....                                                                          | 126 |
| Tabela (5.13) - Efeito do retardo para blocos de sobrecarga.....                                                                         | 134 |





## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                                   |                                                                           |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $a$ .....                                         | Tamanho da trinca.                                                        |
| $N$ .....                                         | Número de ciclos.                                                         |
| $da/dN$ .....                                     | Taxa de propagação da trinca.                                             |
| $N_{pi}$ .....                                    | Número médio de ciclos de retardo para picos de sobrecarga.               |
| $N_{bi}$ .....                                    | Número médio de ciclos de retardo para blocos de sobrecarga.              |
| $NR$ .....                                        | Número de ciclos de retardo.                                              |
| $K$ .....                                         | Fator intensidade de tensão.                                              |
| $K_{máx.}$ .....                                  | Fator intensidade de tensão máximo.                                       |
| $K_{mín.}$ .....                                  | Fator intensidade de tensão mínimo.                                       |
| $K_I$ .....                                       | Fator intensidade de tensão para trinca de modo I de separação da ponta.  |
| $K_c$ .....                                       | Fator intensidade de tensão crítico para tensão plana.                    |
| $K_{Ic}$ .....                                    | Fator intensidade de tensão crítico para deformação plana .               |
| $K_n$ .....                                       | Fator efetivo de concentração de tensão.                                  |
| $K_{req.}$ .....                                  | Fator intensidade de tensão requerido.                                    |
| $K_{red.}$ .....                                  | Fator intensidade de tensão reduzido.                                     |
| $K_{máx. 2,i}$ .....                              | Fator intensidade de tensão máximo no carregamento de referência.         |
| $K_{mín. 2,i}$ .....                              | Fator intensidade de tensão mínimo no carregamento de referência.         |
| $K_{máx.ef. 2,i}$ .....                           | Fator intensidade de tensão máximo efetivo no carregamento de referência. |
| $K_{mín.ef. 2,i}$ .....                           | Fator intensidade de tensão mínimo efetivo no carregamento de referência. |
| $K_{ab}$ .....                                    | Fator intensidade de tensão de abertura da trinca.                        |
| $\Delta K$ .....                                  | Amplitude do fator intensidade de tensão.                                 |
| $\Delta K_{th}$ .....                             | Amplitude do fator intensidade de tensão "threshold".                     |
| $\Delta K_{ef.} \dots (\Delta K_{efetivo})$ ..... | Amplitude do fator intensidade de tensão efetivo.                         |
| $\Delta K_{2,i}$ .....                            | Amplitude do fator intensidade de tensão no carregamento de referência.   |



|                          |                                                                        |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta K_{equivalente}$ | Amplitude do fator intensidade de tensão equivalente.                  |
| $\Delta K_{(r.m.s.)}$    | Amplitude do fator intensidade de tensão raiz quadrada média (r.m.s.). |
| $\sigma_{max.}$          | Tensão máxima.                                                         |
| $\sigma_{min.}$          | Tensão mínima.                                                         |
| $\sigma_m$               | Tensão média.                                                          |
| $\sigma_a$               | Amplitude da tensão.                                                   |
| $\sigma_F$               | Resistência à propagação da trinca.                                    |
| $\sigma_{xx}$            | Tensão normal na direção 'xx'.                                         |
| $\sigma_{yy}$            | Tensão normal na direção 'yy'.                                         |
| $\sigma_{zz}$            | Tensão normal na direção 'zz'.                                         |
| $\sigma_{xy}$            | Tensão normal na direção 'xy'.                                         |
| $\sigma$                 | Tensão normal.                                                         |
| $\sigma_{ij}$            | Tensão normal $\Rightarrow$ equação geral.                             |
| $\sigma_e$               | Tensão de escoamento.                                                  |
| $\sigma_{req.}$          | Tensão requerida.                                                      |
| $\sigma_{min.rms}$       | Tensão mínima (r.m.s.).                                                |
| $\sigma_{max.rms}$       | Tensão máxima (r.m.s.).                                                |
| $\sigma_{max.sc}$        | Tensão máxima de sobrecarga.                                           |
| $\sigma_{max.ref.}$      | Tensão máxima no carregamento de referência.                           |
| $a_0$                    | Tamanho inicial da trinca.                                             |
| $a_{crit.}$              | Tamanho crítico da trinca                                              |
| $a_{ef.}$                | Tamanho efetivo da trinca                                              |
| $a_r$                    | Tamanho da trinca após $r$ ciclos.                                     |
| $(a_p - a)$              | Distância da ponta da trinca até o final da zona plástica.             |
| $a_p$                    | Tamanho $\Rightarrow$ trinca + zona plástica.                          |
| $a_c$                    | Tamanho da trinca no ciclo $i$ .                                       |
| $a_{pi}$                 | Tamanho da trinca $\Rightarrow$ 1 pico de sobrecarga.                  |
| $a_{bi}$                 | Tamanho da trinca $\Rightarrow$ final do bloco de sobrecarga.          |
| $R$                      | Razão de carregamento.                                                 |
| $R_{ef.2,i}$             | Razão de carregamento efetivo.                                         |





|                            |                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------|
| $R_{(r.m.s.)}$             | Razão de carregamento (r.m.s.).                   |
| $R_{sc}$                   | Razão de sobrecarga.                              |
| $R_{sc.inf.}$              | Razão limite inferior de sobrecarga.              |
| $R_{sc.sup.}$              | Razão limite superior de sobrecarga.              |
| $\theta$                   | Ângulo (coordenadas polares).                     |
| $r$                        | Distância (coordenadas polares).                  |
| $r_p$                      | Raio da zona plástica.                            |
| $(r_y)_i$                  | Raio da zona plástica no ciclo $i$ .              |
| $C, n$                     | Constantes da equação de Paris.                   |
| $C_{ind.}$                 | Constante da equação de Paris.                    |
| $C_{genérico}; (C_{gen.})$ | Constantes da equação de Paris para $n_{médio}$ . |
| $(C_p)_i$                  | Parâmetro de retardo para o ciclo $i$ .           |
| $n_{ind.}$                 | Constante da equação de Paris.                    |
| $n_{médio}$                | Valor médio da constante da equação de Paris.     |
| $U$                        | Fração do ciclo com a trinca aberta.              |
| $E$                        | Módulo de elasticidade.                           |
| $\gamma_s$                 | Trabalho elástico.                                |
| $\gamma_p$                 | Trabalho plástico.                                |
| $\beta$                    | Fator geométrico adimensional.                    |
| $f_{ij}(\theta)$           | Função de $\theta$ .                              |
| $\nu$                      | Coefficiente de Poisson.                          |
| $z_p$                      | Zona plástica.                                    |
| $\delta$                   | Comprimento de correção da trinca.                |
| $\lambda$                  | Comprimento de correção da trinca.                |
| $e$                        | Espessura do material.                            |
| $W$                        | Largura do corpo de prova.                        |
| $f$                        | Função.                                           |
| $\phi$                     | Razão ( $a/w$ )                                   |



## RESUMO

Este trabalho estuda a taxa de propagação de trinca por fadiga na liga de alumínio 7475-T761, nas condições de carregamento de amplitude constante e carregamento de amplitude variável. O estudo apresenta o comportamento do material para diversas condições de carregamento de amplitude constante e frequências de 90 Hz e 180 Hz, realizando uma análise comparativa entre os dados experimentais e a equação de Paris. Para os carregamentos de amplitude variável foram aplicados picos e blocos de sobrecarga, para se verificar o efeito do retardo e se determinar as razões de sobrecarga ( $R_{sc}$ ) mínimas que promovem o início do retardo ( $R_{sc} \cong 1,4$  para pico e  $R_{sc} \cong 1,2$  para bloco) e a razão de sobrecarga máxima que produz a parada total da trinca ( $R_{sc} \cong 2,0$ ).





## CAPÍTULO I

### ABSTRACT

## INTRODUÇÃO

The present research is related for the study of fatigue crack propagation in an aluminium alloy 7475 - T761 in constant and variable amplitudes loadings. Two frequencies were studied: 90 Hz and 180 Hz and the Paris equation was successfully used to represent the experimental behavior in constant amplitude loading. In variable amplitude loading are overload and blocks of overloads indicate the minimum and maximum value of  $R_{sc}$  of 1,4 and 1,2 and 2,0 for initiation of retardation and complete "crack arrest".



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.

As falhas repentinas, que ocorrem sem deformação plástica macroscópica, representam um grave problema porque podem atingir proporções catastróficas ocorrendo sem que haja qualquer aviso prévio [1,2].

De um modo geral, a falha de um componente é resultado da ação isolada ou combinada dos seguintes fatores [3,4].

- . projeto inadequado,
- . processos de fabricação inadequados,
- . manutenção incorreta e/ou insuficiente,
- . tensões em serviço acima das esperadas,
- . influência do meio (agressividade),
- . algum tipo de fragilização durante a operação,
- . fadiga, devido a ação de cargas cíclicas, e
- . a utilização de materiais de alta resistência submetidas a altas tensões (o que pode acentuar os fatores anteriores).

A utilização de materiais de alta resistência tem aumentado de forma considerável após a segunda Guerra Mundial, em particular na indústria aeronáutica com o objetivo de reduzir o peso total das estruturas [5].





Atualmente, mais de 80% em peso das estruturas aeronáuticas, são construídas com ligas de alumínio de alta resistência, entre as quais destacam-se as ligas 2024 - T3 e 7075 - T6, consideradas ligas básicas, por serem utilizadas como referência para o desenvolvimento de novas ligas [6,7].

Um problema na utilização de materiais de alta resistência reside no fato de que as melhoras obtidas no nível de resistência estática, nem sempre são acompanhadas por melhoras na resistência à fadiga.

Quando se trata de carregamentos dinâmicos, que representam a maioria dos projetos mecânicos e aeronáuticos, tem-se como consequência direta a ocorrência da variação do carregamento ao longo do tempo, resultando na possibilidade de falha por fadiga.

A fadiga é o fenômeno de falha de um material sob carregamento dinâmico.

Sabe-se que esta falha sob tensão ou deformação cíclica ocorre a níveis de tensões bem menores que sob condições de carregamentos monotônicos [8].

Estima-se que cerca de 90% das falhas em serviços dos componentes que sofrem movimento podem ser atribuídas ao fenômeno de fadiga [9].

Até a década de 50, quase todas as falhas em fadiga e conseqüentemente as pesquisas no ramo eram confinadas a componentes mecânicos. Nas últimas décadas estruturas inteiras (Exemplos: vasos de pressão, foguetes, fuselagem de aviões, etc) têm sido estudadas e ensaiadas. Isso deve-se ao emprego de materiais, como ligas de alta resistência, que acopladas a avanços na tecnologia de fabricação,



resultam em estruturas monolíticas destinadas a sustentar aplicações de altas tensões cíclicas em serviço. A classe de materiais de alta resistência, que tem apresentado falhas de fadiga, e as quais os conceitos da mecânica da fratura tem sido aplicados [9].

O desenvolvimento conseguido no campo da mecânica da fratura possibilitou o aparecimento da filosofia para o projeto estrutural denominada falha-segura [9,10].

A Mecânica de Fratura Linearmente Elástica (MFLE), que correlaciona a taxa de propagação da trinca por fadiga  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  e o fator intensidade de tensão ( $k$ ), tem apresentado bons resultados na previsão de vida útil de estruturas para os materiais de alta resistência nos quais a deformação plástica que antecede a ruptura é pequena. Para materiais muito dúcteis devem ser empregados os princípios da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) [11].

A taxa de crescimento da trinca por fadiga  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  é função do material, da geometria da amostra, do meio ambiente e do valor do carregamento aplicado [12,13].

## 1.2 - OBJETIVO DO TRABALHO.

Neste trabalho será estudada a propagação de trinca por fadiga em uma liga de alumínio de alta resistência 7475 - T761, utilizada na indústria aeronáutica principalmente como revestimento superior e inferior das asas, longarinas das asas, estrutura central das asas e fuselagem principal, em aeronaves comerciais, de transporte e militares [14].





Como resultado do desenvolvimento da mecânica da fratura linear elástica, vários pesquisadores propuseram fórmulas empíricas, para prever o comportamento da taxa de propagação da trinca para carregamentos de amplitude constante e carregamentos de amplitude variável. O desempenho das equações do tipo de Paris (potenciais em termos de fator intensidade de tensão), serão analisadas com os dados experimentais obtidos.

Será analisado o comportamento da liga de alumínio 7475-T761, para diversos níveis de carregamento, variando-se a frequência dos ensaios para a determinação de eventuais interferências na taxa de propagação da trinca.

Serão realizados ensaios para diferentes razões de carga, procurando identificar os seus efeitos sobre o comportamento do material.

Serão realizados ensaios com carregamento de amplitude variável com o objetivo de se determinar os limites superior e inferior de sobrecarga correspondentes, respectivamente, a razão de carregamento que determina a parada total da propagação da trinca quando o carregamento retorna ao carregamento de referência e a razão mínima de carregamento, onde o efeito da sobrecarga não altera a condição normal de propagação da trinca.



## CAPÍTULO 2

### A FALHA POR FADIGA

#### 2.1 - INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que a falha por fadiga é uma falha progressiva de um componente ou estrutura que se encontre submetido a carregamentos prolongados (estáticos, repetidos, cíclicos ou flutuantes).

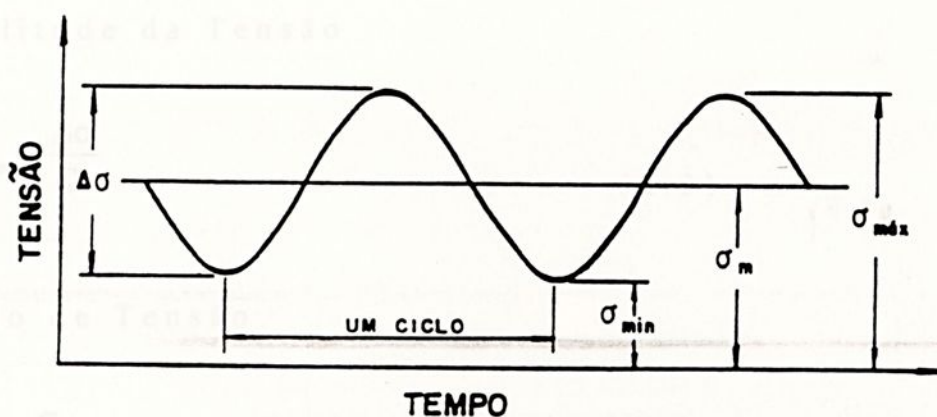
Uma das mais graves consequências destes carregamentos sobre um componente ou estrutura é que poderá ocorrer a falha do mesmo, ainda que os níveis de tensão envolvidos no processo sejam menores do que aqueles necessários para ocasionarem a falha instantânea sob condições estáticas de projeto [8,9]. A este fenômeno atribui-se o nome de fadiga, que é uma das fontes mais comuns de falhas primárias que ocorrem em componentes mecânicos sob condições operacionais, tais como aros e rodas de caminhões, estruturas aeronáuticas na decolagem, em vôo e aterragem etc [15].

A seqüência para a ocorrência da falha por fadiga inicia com a nucleação da trinca por deformação plástica localizada, vinculada ao crescimento inicial ao longo de planos de escorregamento. A seguir, tem-se o crescimento da trinca num plano perpendicular ao da direção da tensão principal de tração. A terceira e última fase é caracterizada pela fratura brusca final, onde a trinca atinge um tamanho crítico que impossibilita o seu crescimento de forma estável [16,17].





Os parâmetros que caracterizam um ciclo de carregamento estão indicados na figura (2.1) e definidos nas equações de (2.1) até (2.8):



Figura(2.1)-Parâmetros que caracterizam o ciclo de carregamento [8].

#### - Tensão Máxima

$\sigma_{\max}$  = Maior valor algébrico atingido pela tensão durante o ciclo.

#### - Tensão Mínima

$\sigma_{\min}$  = Menor valor algébrico atingido pela tensão durante o ciclo.

#### - Tensão Média

$$\sigma_m = \left( \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right) \quad (2.1)$$

- Variação da Tensão

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2.2)$$

- Amplitude da Tensão

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2.3)$$

- Razão de Tensão

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.4)$$

A relação dos parâmetros característicos de um ciclo de carregamento com o fator intensidade de tensão ( $K$ ), resultam:

- Fator intensidade de tensão máximo:

$$K_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \beta \quad (2.5)$$

- Fator de intensidade de tensão mínimo:

$$K_{\min} = \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \beta \quad (2.6)$$

- Variação do fator intensidade de tensão:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sqrt{\pi a} \beta \quad (2.7)$$





- Razão de carregamento:

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.8)$$

## 2.2 - O MECANISMO DE FALHA POR FADIGA

O processo de falha por fadiga de um material é iniciado pela formação de microtrincas que coalescem, crescem e se tornam macrotrincas que se propagam até que ocorra a ruptura final [17].

Nas condições normais de trabalho de um componente, as trincas de fadiga iniciam-se em função de singularidades (riscos, mudanças de seção, pontos de corrosão, inclusões e contornos de grãos) presentes na superfície do componente ou logo abaixo da mesma. As microtrincas podem também estar presentes no material como resultado de operações de solda, rebitagem, tratamentos térmicos, trabalhos mecânicos, etc [17].

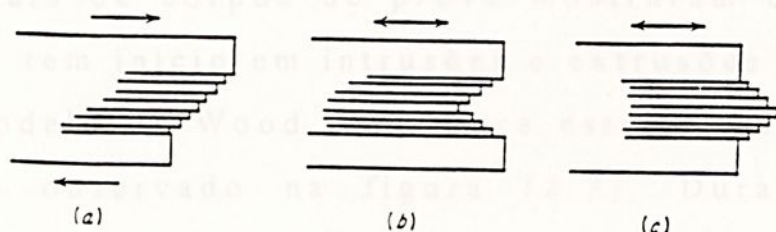
A nucleação das trincas de fadiga ocorre por um processo de deformação plástica localizada, em escala microscópica, quando se formam intrusões e extrusões, que podem crescer e se transformar em microtrincas [1,22].

São estas microtrincas que por um processo contínuo de propagação irão originar as macrotrincas (fissura que apresentam um tamanho mínimo suficiente para ser detectado usando-se técnicas de inspeção não destrutivas) [22].

### 2.2.1 - A nucleação da trinca por fadiga

Trincas sob fadiga iniciam-se em singularidades ou descontinuidades nos metais. Tais descontinuidades podem estar na superfície ou próximos à superfície. As singularidades podem ser estruturais, tais como riscos, mudanças de seção, pontos de corrosão, etc [18].

Wood [19], sugeriu um mecanismo para explicar a ocorrência das trincas de fadiga, baseado na ocorrência de microdeformações na superfície do material submetido a carregamentos de fadiga, que provocam o surgimento de extrusões e intrusões, que podem crescer e se propagar como uma trinca de fadiga, conforme pode ser observado na figura (2.2).



Figura(2.2)-Microdeformação  $\Rightarrow$  trinca de fadiga;

(a) deformação estática; (b) deformação por intrusão;  
(c) deformação por extrusão [18].

Gough [20] mostrou que um metal sob carregamento cíclico se deforma por deslizamento nos mesmos planos atômicos e nas mesmas direções cristalográficas que em deformação unidirecional. As linhas de deslizamento, quando ocorrem, podem atingir um valor de saturação que



são observadas como regiões distorcidas de deslizamento intenso.

As trincas geralmente ocorrem em regiões de deformação intensa, paralelas ao que originalmente foi uma banda de deslizamento persistente (aparecem mesmo após o ataque químico da superfície).

As bandas de deslizamento persistente são trincas de fadiga embrionárias, uma vez que, após a aplicação de pequenas deformações de tração, elas se transformam em trincas macroscópicas [18].

Uma singularidade estrutural importante para deformação em fadiga é a formação de ressaltos e reentrâncias na superfície denominadas intrusões e extrusões [19,21].

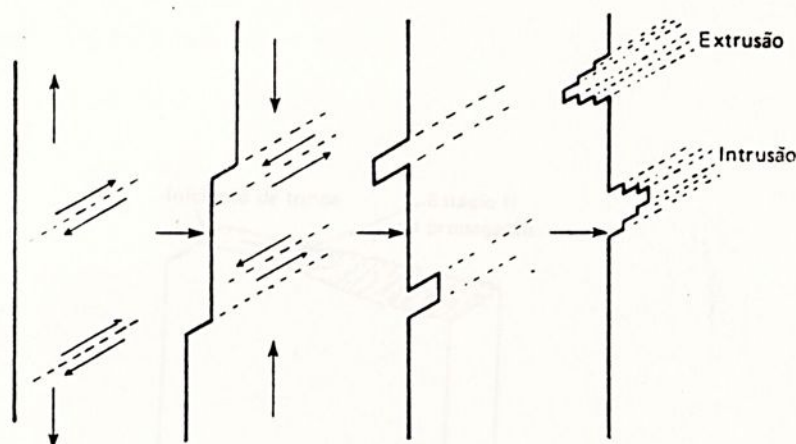
Metalografias realizadas cuidadosamente nas seções transversais de corpos de prova mostraram que as trincas de fadiga tem início em intrusões e extrusões [19].

O modelo de Wood [19], para esta forma de nucleação pode ser observado na figura (2.3). Durante parte do carregamento do ciclo, o deslizamento ocorre num plano de deslizamento favoravelmente orientado e, durante parte do descarregamento do ciclo, o deslizamento reverso ocorre num plano paralelo porque o deslizamento no primeiro plano é inibido devido ao encruamento e talvez pela oxidação da superfície livre recém-criada.

O primeiro deslizamento cíclico pode criar uma extrusão ou uma intrusão na superfície.

Uma intrusão pode crescer e formar uma trinca por continuidade de deformação plástica durante os ciclos subseqüentes.

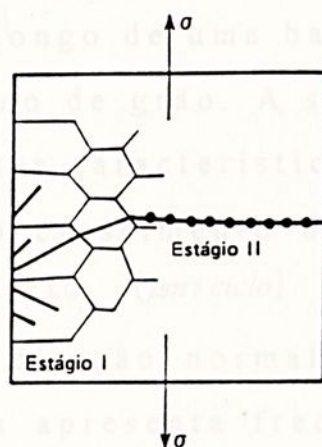




Figura(2.3)-Modelo de Wood para a nucleação de trincas de fadiga [9].

### 2.2.2 - O mecanismo da propagação da trinca em fadiga.

As trincas de fadiga, uma vez formadas, tendem a se propagar inicialmente ao longo dos planos de deslizamento, (**estágio I**) embora em seguida tomem a direção normal à maior tensão de tração aplicada (**estágio II**). A propagação da trinca de fadiga é normalmente transgranular, figura(2.4) e figura(2.5) [23].



Figura(2.4)- Estágios I-II: Propagação de trinca-esquemático [9].





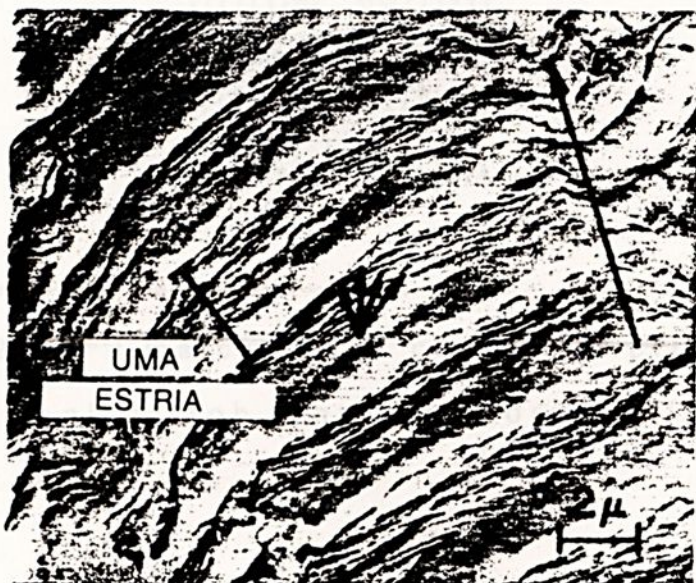
Figura(2.5)- Superfície de fratura em fadiga -  
esquemático[9].

Na figura (2.5), verifica-se que próximo ao ponto de iniciação, estágio I, a trinca propaga-se sob condições de deformação plana; no estágio II, a trinca propaga-se sob condições de tensão plana [9].

Durante o **estágio I** o crescimento da trinca é de alguns nanômetros por ciclo (nm/ciclo) e caracteriza-se pela propagação ao longo de uma banda de deslizamento até encontrar um contorno de grão. A superfície de fratura não apresenta propriedades características.

No **estágio II** o crescimento da trinca é da ordem de micrômetros por ciclo ( $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ ) e caracteriza-se pela propagação em uma direção normal à tensão de tração. A superfície de fratura apresenta frequentemente a formação de rugas ou estrias de fratura por fadiga, Figura(2.6).

Verificou-se, através de ensaios de fadiga com amplitudes programadas, que estas estrias representam a posição sucessiva de uma frente de trinca em cada ciclo [23,24,25].



Figura(2.6)-Estrias de fadiga:cobre trabalhado a frio[18].

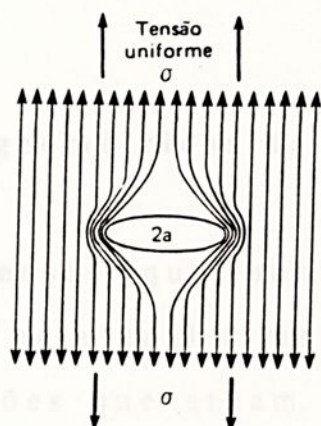
O requisito fundamental para a propagação de trinca é que a tensão na ponta da mesma deve ultrapassar a tensão coesiva teórica do material [9].

A falha de um componente com trinca é sempre associada à presença de concentradores de tensão.

Considere uma placa contendo uma trinca central sujeito a tensão uniforme de tração conforme a figura (2.7), na qual a tensão esta sendo transmitida de uma extremidade da placa a outra por meio de linhas de força.



## 2.3 - ELEMENTOS DA MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA



Figura(2.7)- Uma cavidade central elíptica em uma placa sob tensão uniforme  $\sigma$  [9].

Na figura (2.7), nota-se a perturbação das linhas de força nas extremidades da cavidade [9].

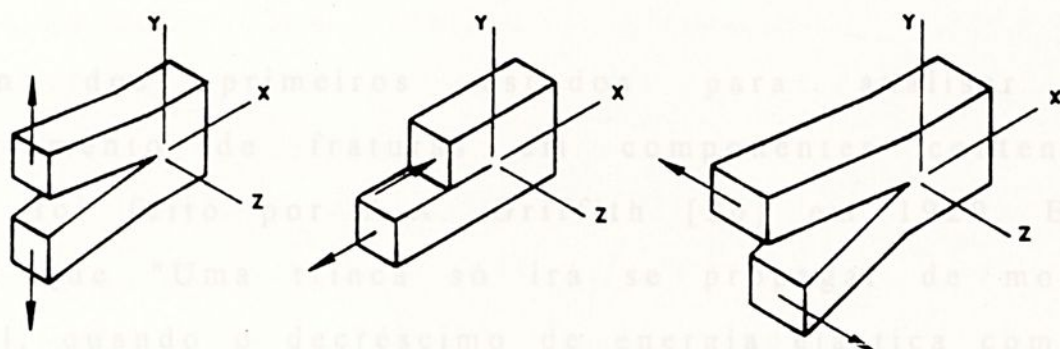
Observa-se que, nas extremidades, o espaçamento das linhas é uniforme, enquanto que na região central as mesmas são distorcidas severamente pela presença da trinca, isto é, o campo de tensão é perturbado. As linhas de força comportam-se como linhas elásticas, que tentam minimizar seus comprimentos, gerando o agrupamento próximo às extremidades da trinca.

Este agrupamento acarreta uma redução do espaçamento local e, conseqüentemente, um aumento da tensão local. Em consequência, uma trinca de comprimento  $2a$  pode produzir tensões locais diversas vezes superiores à tensão uniforme  $\sigma$  [9].

## 2.3 - ELEMENTOS DA MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA

### 2.3.1 - Modos geométricos da fratura

O campo de tensão que ocorre na ponta da trinca depende da maneira pela qual a mesma é solicitada e todos os sistemas de tensões que atuam sobre uma trinca podem ser obtidos a partir dos três modos básicos de carregamento mostrados na figura (2.8).



**Modo I**

**Modo II**

**Modo III**

modo-abertura

modo-escorregamento

modo-rasgamento

Figura(2.8)- Os três modos de fratura [9].



O **Modo I** é chamado de modo de abertura. A tensão de tração é normal às faces da trinca.

O **Modo II** é chamado de modo de escorregamento. A tensão é normal à aresta que avança e apresenta comportamento análogo a discordância em cunha.

O **Modo III** é chamado de modo de rasgamento ou cisalhamento transversal. A tensão é paralela à aresta que avança e apresenta comportamento análogo à discordância em hélice.

Neste trabalho foi utilizado o **Modo I** de separação, que corresponde ao modo de abertura da trinca.

### 2.3.2 - Histórico

Um dos primeiros estudos para analisar o comportamento de fraturas em componentes contendo trincas foi feito por A.A. Griffith [26] em 1920. Ele conclui que "Uma trinca só irá se propagar de modo instável, quando o decréscimo de energia elástica com a propagação for pelo menos igual à energia necessária para criar as duas novas superfícies da trinca".

A teoria de Griffith conclui que o crescimento da trinca em um material ocorre quando o produto  $\sigma\sqrt{a}$  atinge um valor crítico constante definido por uma constante e pelas propriedades Módulo de Elasticidade ( $E$ ) e Energia Superficial ( $\gamma_s$ ), características do material.



Estudos posteriores demonstraram que a teoria de Griffith aplicava-se de forma satisfatória para materiais completamente frágeis (vidro), mas não apresentava uma boa representatividade quando os materiais apresentavam características de ductilidade. No caso dos metais ducteis, por exemplo, verificou-se, que devido à plasticidade gerada na ponta da trinca, a energia necessária para a fratura deve ser muito maior que a energia consumida para a criação das novas superfícies.

Se o material no qual a trinca está se desenvolvendo pode-se deformar plasticamente, a forma da ponta da trinca altera-se devido a tensões concentradas nas vizinhanças da ponta da trinca. Nestes casos, uma certa quantidade de trabalho plástico ( $\gamma_p$ ) é feita durante a propagação da trinca, além do trabalho elástico ( $\gamma_s$ ) feito para a criação de duas superfícies de fratura [9-27].

A observação deste comportamento fez com que Irwin [28], em 1949 sugerisse uma modificação na teoria de Griffith, acrescentando um trabalho de deformação plástica ( $\gamma_p$ ) a energia elástica ( $\gamma_s$ ), fornecendo como resultado a resistência do material ao crescimento da trinca ( $\sigma_F$ ).

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{2E}{\pi \cdot a} (\gamma_s + \gamma_p)} \quad (2.9)$$





### 2.3.3- Singularidade de tensão na ponta da trinca

Em 1957, Irwin [28], analisando as tensões próximas a ponta da trinca, verificou que as tensões locais, poderiam ser representadas por um único parâmetro, **K**, denominado de fator intensidade de tensão, definido por:

\* Para chapas com largura infinita, com trinca central passante.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.10)$$

\* Para chapas com largura finita

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \beta \quad (2.11)$$

onde:

$\sigma$  = Tensão nominal aplicada

$a$  = Meio comprimento de trinca

$\beta$  = Fator adimensional, função da geometria da trinca, do componente e do modo de separação da trinca.

A Mecânica da Fratura Linear Elástica é o mais novo tratamento no esforço de prevenir a fratura catastrófica.

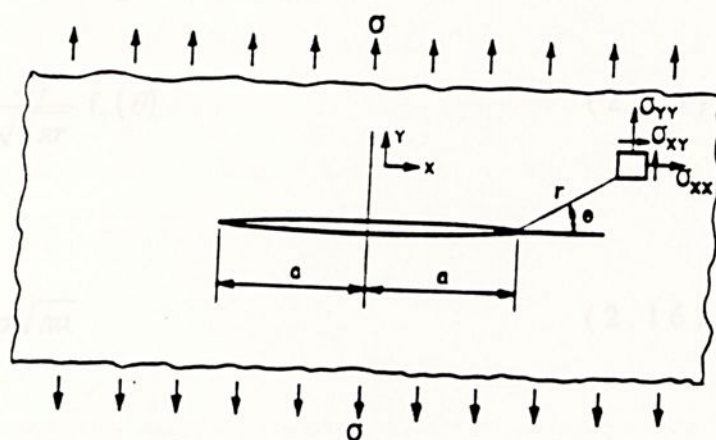
Este tratamento é baseado no conceito de que a tenacidade à fratura é a força necessária para estender uma trinca através de um membro estrutural.



A Mecânica da Fratura Linear Elástica adota um tratamento inteiramente novo em projeto contra a fratura. Ela não se preocupa com a prevenção da nucleação das trincas. Ao contrário, admite que sempre haverá defeitos em um elemento estrutural e busca a resposta à pergunta: Dada uma certa tensão, qual o maior tamanho de trinca que pode

ser tolerado sem ocorrer a falha do elemento? Sabendo-se a resposta, resta só usar as técnicas de inspeção para selecionar o material que não possua defeitos maiores que o tamanho crítico para uma dada tensão projetada [27].

Estudando o campo de tensões elásticas à frente da trinca no Modo I, Westergaard [29] considerou uma chapa infinita, homogênea, isotrópica e elástica, com uma trinca reta e passante de comprimento  $2a$ , conforme figura (2.9).



Figura(2.9)- As tensões na ponta de trinca [30].

A placa esta sujeita a uma tensão de tração  $\sigma$  a uma distância infinita da trinca e normal à mesma.



Considerando o sistema de coordenadas polares cilíndricas com origem na ponta da trinca, Westergaard chegou às seguintes expressões para as tensões:

$$\sigma_{xx} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2.12)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (2.13)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (2.14)$$

Estes são os primeiros termos de uma série expandida normalmente considerados como solução exata para  $r \ll a$ .

As equações (2.12), (2.13) e (2.14) podem ser escritas na seguinte forma geral, equação (2.15).

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.15)$$

onde:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.16)$$

O termo  $K_I$  é denominado de fator intensidade de tensão no Modo I de abertura da trinca. Para os Modos II e III, obtém-se um resultado análogo com a observação de que  $f_{ij}(\theta)$  são diferentes [31].

Na equação (2.16), o valor do fator intensidade de tensão está diretamente relacionado à tensão nominal aplicada,  $\sigma$ , e a raiz quadrada do comprimento da trinca ( $a$ ).

A forma geral do fator intensidade de tensão é dada por:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \beta \quad (2.17)$$

onde  $\beta$  é um parametro que depende do componente estrutural e da geometria das trincas.

Deste modo, para o cálculo do estado de tensão na ponta da trinca, deve ser determinado o  $\beta$  adequado para cada situação.

Em manuais podem ser encontradas soluções para determinadas configurações, como: Chapa sob tração, normal à superfície da trinca central  $\Rightarrow \beta = (1,77 + 0,454\varphi - 2,04\varphi^2 + 21,6\varphi^3) / \sqrt{\pi}$  para  $(\varphi < 1)$  e Chapa sob tração, normal às superfícies das duas trincas laterais simétricas  $\Rightarrow \beta = 1,98 + 0,72\varphi - 8,48\varphi^2 + 27,36\varphi^3$  para  $(\varphi < 1)$ , onde  $\varphi = a/w$ . Para geometrias específicas, há diversas maneiras de se calcular  $\beta$ , que podem ser divididos em métodos analíticos, experimentais ou numéricos [27,55,56,57,58,59,64].

A tensão  $\sigma_{yy}$  apresenta valores muito elevados na ponta da trinca, decrescendo com o afastamento da mesma. Tem-se desta forma um gradiente na tensão  $\sigma_{yy}$ .

A tensão  $\sigma_{xx}$  é nula porque não existe na ponta da trinca nenhuma restrição à deformação elástica segundo a direção  $x$ . Para materiais suficientemente espessos, pode ainda ser observada uma tensão,  $\sigma_{zz} = 0$  nas proximidades da





superfície externa (estado plano de tensão) até um valor máximo no interior do material dado pela equação (2.18), caracterizado por um estado plano de deformação.

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (2.18)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material

Desta forma considera-se que componentes com pequena espessura  $\left( e \leq \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_I}{\sigma_e} \right]^2 \right)$ , submetidos a um

carregamento de tração apresentam predominantemente um estado plano de tensão na ponta da trinca, enquanto que em componentes

espessos  $\left( e \geq 2,5 \left[ \frac{K_I}{\sigma_e} \right]^2 \right)$  predomina o estado plano de deformação [30].

Sendo a fratura um processo altamente localizado na ponta da trinca, é natural supor que ela seja considerada pelos campos de tensão e deformação, os quais são descritos completamente pelo fator intensidade de tensão.

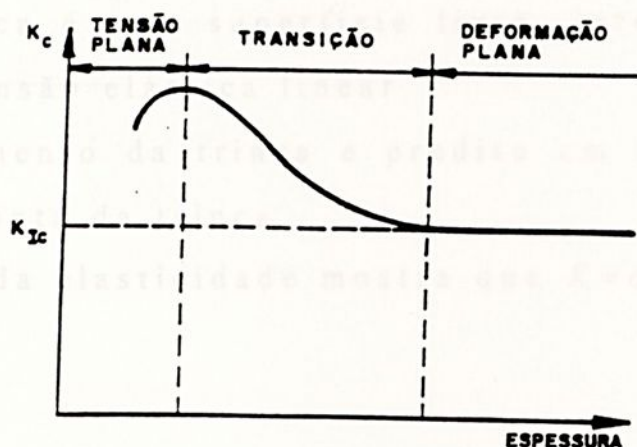
De fato, verifica-se a existência de um valor crítico desse fator para o qual ocorre a propagação instável da trinca, ocasionando a fratura repentina do corpo [9].

Isto significa, que durante a solicitação, com o aumento progressivo da tensão, em componentes com trinca feitos de um mesmo material mas apresentando variações de espessura e tamanhos diferentes de trinca, a fratura dos mesmos ocorrerá com valores diferentes da tensão nominal, porém, a um mesmo valor crítico,  $K_{Ic}$ , do fator intensidade de tensão [9,30].



A variação do valor de  $K_{Ic}$  com a espessura pode ser observada na figura (2.10) onde se verifica a redução assintótica do valor de  $K_{Ic}$  à medida que o estado de deformação plana predomina no interior do material.

Este valor, identificado como  $K_{Ic}$  é denominado de tenacidade à fratura em deformação plana. A tenacidade à fratura em tensão plana é identificado simplesmente por  $K_{Ic}$  e deve ser especificado junto com a espessura a que se refere [32].



Figura(2.10)-Tenacidade à fratura x espessura [33].

Admitindo que a taxa de crescimento da trinca por ciclo,  $da/dN$ , pode ser expressa como uma função do fator intensidade de tensão na ponta da trinca conclui-se que com uma equação matemática que descreva o processo de crescimento da trinca e as condições de contorno para este crescimento pode-se prever a vida em fadiga de um componente [33].



O modelo para a ponta da trinca, admite que o componente sob tensão contendo uma trinca tem uma pequena região plasticamente deformada na ponta da mesma, sendo esta região plástica circundada por uma região de grandes dimensões sob tensão elástica [9].

#### 2.3.4- Hipóteses da mecânica da fratura linear elástica

Admite-se que [9]:

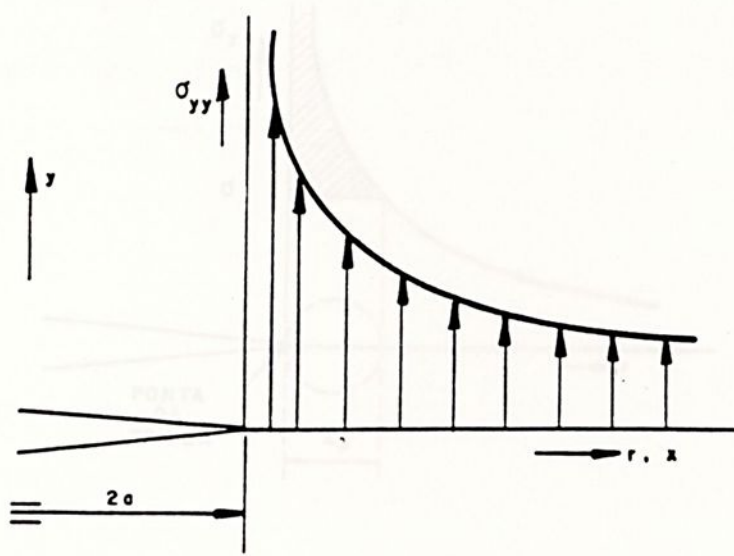
- a) As trincas sempre estão presentes no material;
- b) Uma trinca é uma superfície livre, interna e plana num campo de tensão elástica linear.
- c) O crescimento da trinca é predito em termos de tensão agindo na ponta da trinca.
- d) A teoria da elasticidade mostra que  $K = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot \beta$ .



Figura (2.11)-Distribuição de tensões elásticas em  $y$  para  $\theta = 0$  [8].

## 2.4 - DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA ZONA PLÁSTICA NA PONTA DA TRINCA

A figura (2.11) representa a distribuição de  $\sigma_{yy}$  próximo à ponta da trinca, conforme a equação (2.5). Pode-se verificar que, para  $r$  tendendo a zero, a tensão  $\sigma_{yy}$  tende a ser infinita, o que na realidade não ocorre. O que acontece é que a deformação plástica na ponta da trinca mantém as tensões finitas [8].



Figura(2.11)-Distribuição de tensões elásticas em  $y$  - para  $\theta = 0$  [8].

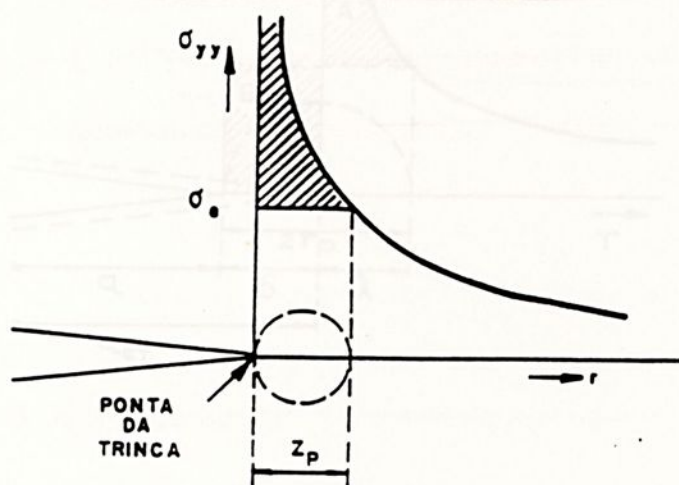
Uma primeira aproximação para o tamanho da zona plástica na ponta da trinca no estado plano de tensão é obtido usando  $\sigma_y = \sigma_c$  e  $\theta = 0$  na equação (2.5).



Representando o tamanho da zona plástica por  $z_p$ , tem-se:

$$z_p = \frac{k^2}{2\pi\sigma_e^2} \quad (2.19)$$

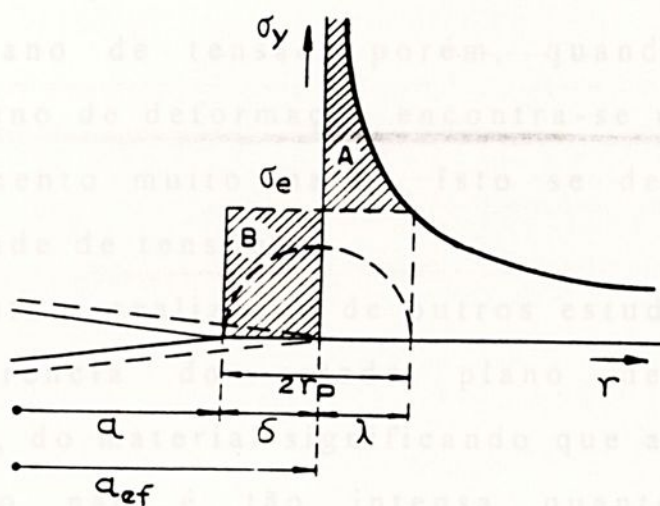
A representação desta aproximação para o tamanho da zona plástica na ponta da trinca pode ser observada na figura (2.12).



Figura(2.12)- A primeira estimativa da zona plástica na ponta da trinca [30].

Analisando o resultado verifica-se que o tamanho da zona plástica obtida é menor do que aquela que efetivamente existe, pois a carga, representada pela área hachurada, também deve ser suportada pelo material, o que só é possível com uma redistribuição da tensão à frente da região plástica, aumentando o seu tamanho.

Para determinar o tamanho efetivo da zona plástica, Irwin [28] sugeriu que a deformação plástica faz com que a trinca se comporte como se fosse maior que o seu tamanho real e propôs que o comprimento efetivo da trinca ( $a_{ef}$ ) fosse igual a soma do tamanho físico da trinca ( $a$ ) mais um comprimento de correção ( $\delta$ ) conforme pode ser observado na figura (2.13).



Figura(2.13)- A zona plástica de Irwin [30].

O limite de escoamento do material,  $\sigma_e$ , restringe a tensão na ponta da trinca efetiva ( $a_{ef}$ ) e também atua na parte  $\delta$  na frente da trinca real ( $a$ ).

Para que a carga não considerada na primeira aproximação (área A) seja incorporada, é necessário que a área B seja igual à área A. Através do cálculo das variáveis  $\lambda$  e  $\delta$ , obtém-se:  $\delta \cong \lambda = r_p$  onde  $r_p$  é o raio da zona plástica.



Desta forma, tem-se que o tamanho da zona plástica corrigida por Irwin é duas vezes maior que a estimativa anterior ou seja: O tamanho da zona plástica na direção  $\theta=0$  é dado por  $2 r_p$  conforme equação (2.20).

$$2r_p = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{k_I}{\sigma_e} \right]^2 \quad (2.20)$$

A zona plástica de Irwin foi desenvolvida para o estado plano de tensão; porém, quando se trabalha no estado plano de deformação encontra-se uma tensão efetiva de escoamento muito maior. Isto se deve à condição de triaxialidade de tensões.

Durante a realização de outros estudos verificou-se a não ocorrência do estado plano de deformação na superfície, do material significando que a tensão efetiva de escoamento não é tão intensa quanto a inicialmente prevista. Desta forma, a extensão da região deformada plasticamente, ajustada, no modo I e no estado plano de deformação é normalmente calculada através da expressão (2.21) [1,34].

$$2r_p = \frac{1}{3\pi} \left[ \frac{k_I}{\sigma_e} \right]^2 \quad (2.21)$$

Experiências realizadas com diversas ligas metálicas permitiu estabelecer as condições para a ocorrência de tensão plana ou deformação plana na ponta da trinca, como função da espessura do material com trinca [27,35].



$$e \geq 2,5 \left[ \frac{k_I}{\sigma_E} \right]^2 \quad \text{para deformação plana (2.22)}$$

$$e \leq \frac{1}{\pi} \left[ \frac{k_I}{\sigma_E} \right]^2 \quad \text{para tensão plana (2.23)}$$

A variação da espessura para a passagem da condição de tensão plana para a condição de deformação plana, implica na ocorrência de uma região de transição como pode ser observado na figura (2.10). Pinto Júnior [35] considerou uma variação linear nesta região de transição, chegando à seguinte expressão:

$$2r_p = \frac{1}{3\pi} + \frac{2}{3\pi} \left[ \frac{2,5 - e \left[ \frac{k_I}{\sigma_E} \right]^{-2}}{2,5 - \frac{1}{\pi}} \right] \left[ \frac{k_I}{\sigma_c} \right]^2 \quad (2.24)$$





## CAPÍTULO 3

### A PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA: OBSERVAÇÕES EXPERIMENTAIS E MODELAGENS

#### 3.1- INTRODUÇÃO

O estudo da propagação das trincas por fadiga compõe uma das principais linhas de pesquisa em fadiga adotada atualmente, que é análise da sobrevida de um componente em presença de uma macrotrinca. Pode-se definir como macrotrinca a fissura que apresenta um tamanho suficiente para permitir a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura [23].

O interesse na propagação da trinca tem aumentado com o desenvolvimento de melhores métodos de detecção, monitorização e predição do crescimento da trinca, acompanhado do reconhecimento de que, em muitos casos, uma grande parte da vida total do componente é gasta na propagação da trinca [36].

Um determinado componente, mesmo sem falhas preexistentes, pode desenvolver uma trinca como resultado de fadiga do componente. Em alguns casos estudados foi observado que o crescimento da trinca consumiu mais de 90% da vida útil do componente e, em outros, foi observado que a trinca iniciada por fadiga cresce até um determinado comprimento e, em seguida, é interrompida, não voltando mais a crescer [9,18].

Por muitos anos, a indústria aeronáutica empenha-se em prever o crescimento da trinca por fadiga. Mais recentemente, este empenho tem sido observado também nas indústrias automotiva e nuclear, sempre com objetivo de garantir a segurança e a utilização racional dos materiais.

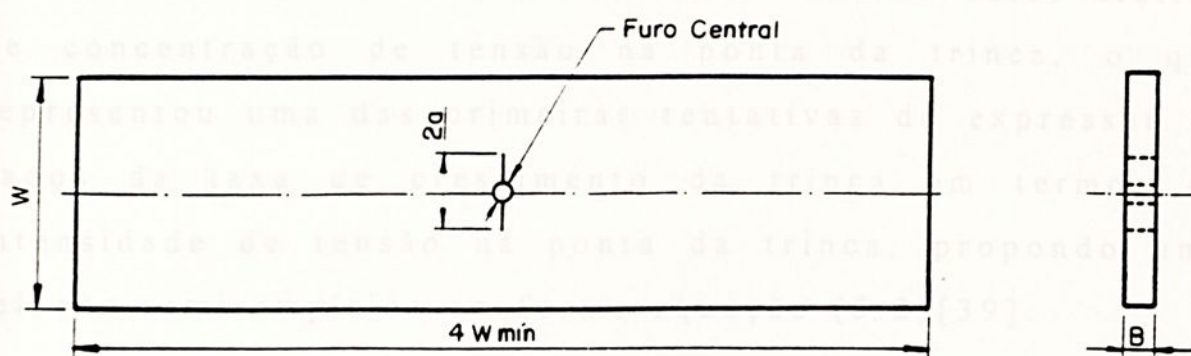
A revisão dos modos de comportamento e a determinação quantitativa do crescimento da trinca por fadiga nos materiais de alta resistência é baseado na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) [11]. No caso dos materiais muito dúcteis, a mecânica da fratura linear elástica não representa com precisão o campo de tensões na ponta da trinca; nestes casos, devem ser empregados os conceitos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) [11].

Muitos dos estudos experimentais de crescimento da trinca por fadiga foram feitos com carregamentos de amplitude constante. Uma chapa com trinca central, conforme figura (3.1), representa um dos tipos de corpos de prova mais utilizados na realização dos ensaios. O comprimento da trinca,  $2a$ , é avaliado como uma função do número de ciclos e do nível de carregamento, sendo este comprimento monitorado por métodos ópticos, ultrasônicos etc [37].

Uma grande variedade de expressões empíricas de crescimento da trinca foi proposta, relacionando a taxa de crescimento da trinca ( $da/dN$ ) com a tensão aplicada, o comprimento da trinca, o fator intensidade de tensão e outros parâmetros [12,13,38].







Figura(3.1)- Modelo de corpo de prova usado em ensaios de fadiga (tração-tração) [30].

Head, Frost e Dugdale e Liu desenvolveram relações que associavam a taxa de crescimento da trinca com a tensão aplicada, o comprimento da trinca e algumas constantes empíricas resultando em equações do tipo da equação (3.1)[39].

$$\frac{da}{dN} = C\sigma^m a^n \quad (3.1)$$

onde:

$\sigma$  = tensão aplicada

$a$  = comprimento da trinca

$C, m, n$  = constantes empíricas

McEvily e Illg interpretaram os dados da taxa de crescimento da trinca ( $da/dN$ ) em termos de fator efetivo de concentração de tensão na ponta da trinca, o que representou uma das primeiras tentativas de expressar os dados da taxa de crescimento da trinca em termos de intensidade de tensão na ponta da trinca, propondo uma relação semi-empírica conforme equação (3.2)[39].

$$\log \frac{da}{dN} = C_1 K_n - C_2 - \frac{C_3}{(K_n - C_4)} \quad (3.2)$$

onde:

$K_n$  = fator efetivo de concentração de tensão

$C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  = Constantes empíricas

Em 1963, Paris e Erdogan [39] mostraram que a taxa de crescimento da trinca por ciclo de carregamento, ( $da/dN$ ), pode ser descrita como função da variação do fator intensidade de tensão  $\Delta K$ , conforme equação (3.3).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.3)$$

onde:

$C, n$  = constantes do material

$\Delta K$  = variação do fator intensidade de tensão





O fator intensidade de tensão na ponta da trinca varia a cada instante em carregamento cíclico, devido à variação da tensão aplicada e também ao incremento no comprimento da trinca. Nos ciclos de carregamento tem-se uma variação da tensão nominal aplicada, de um valor máximo ( $\sigma_{\max}$ ) até um valor mínimo ( $\sigma_{\min}$ ), que corresponde a uma variação do fator intensidade de tensão de  $K_{\max}$  até  $K_{\min}$  conforme as equações (2.7) e (2.8) redefinidas a seguir.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sqrt{\pi a} \beta \quad (2.7)$$

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.8)$$

Observa-se que  $K_{\max}$ ,  $K_{\min}$ ,  $\Delta K$  e  $R$  são interdependentes. A definição de quaisquer dois destes parâmetros é suficiente para definir os demais e, conseqüentemente, definir a condição de carregamento.

O estudo do crescimento da trinca por fadiga envolve três aspectos principais [16].

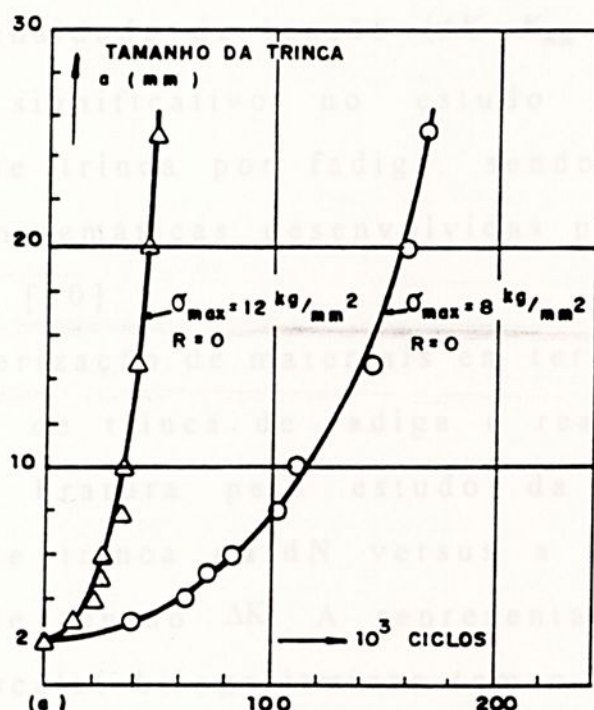
- \* O tamanho inicial da trinca ( $a_0$ )
- \*\* O tamanho crítico da trinca ( $a_{\text{crit.}}$ )
- \*\*\* O período de crescimento da trinca entre  $a_0$  e

$a_{\text{crit.}}$

O tamanho inicial da trinca corresponde ao menor tamanho observável pelas técnicas de inspeção não destrutíveis disponíveis atualmente.

O tamanho crítico da trinca, em tese, pode ser determinado através da mecânica da fratura.

O período de crescimento da trinca é determinado através de curvas de crescimento da trinca por ciclos de tensão alternados, conforme figura (3.2).



Figura(3.2)- Curvas representativas da propagação da trinca por fadiga [18].

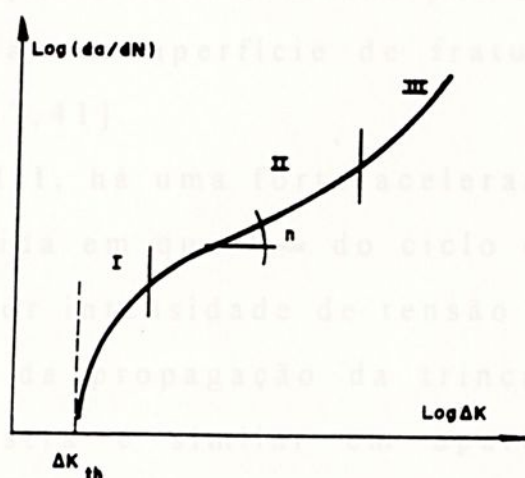
A determinação experimental das curvas de crescimento das trincas por fadiga, para todas as condições de carregamento, componentes, tamanho e condições da trinca em uma estrutura, representa uma tarefa praticamente impossível de ser realizada, o que demonstra a grande importância da elaboração de modelos matemáticos que consigam relacionar os resultados obtidos em laboratório, com os resultados práticos obtidos em condições normais de serviço.



### 3.2- FADIGA COM CARREGAMENTO DE AMPLITUDE CONSTANTE

O trabalho realizado por Paris e Erdogan [39], associando a taxa de crescimento da trinca  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  à variação do fator intensidade de tensão ( $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ), representou um avanço significativo no estudo do fenômeno de propagação de trinca por fadiga, sendo muito usado em modelagens matemáticas desenvolvidas para as aplicações de engenharia [40].

A caracterização de materiais em termos de resistência à propagação de trinca de fadiga é realizada através da Mecânica de Fratura pelo estudo da relação taxa de propagação de trinca  $da/dN$  versus a variação do fator intensidade de tensão  $\Delta K$ . A representação gráfica desta relação em escalas bilogarithmicas tem o formato sigmoidal e apresenta três regiões distintas como pode ser observado na figura (3.3).



Figura(3.3)- Taxa de propagação da trinca ( $da/dN$ ) versus fator intensidade de tensão cíclico ( $\Delta K_{th}$ ) [18].

Na região I, a taxa de propagação da trinca torna-se cada vez menor com o decréscimo de  $\Delta K$ . Nesta região, a trinca não avança de uma quantidade definida por ciclo, mas de maneira complexa, geralmente por perda de coesão ao longo de planos de deslizamento. Existe, nesta região, o limite  $\Delta K_{th}$ , abaixo do qual as trincas não crescem.

É uma região particularmente importante para o desenvolvimento de projetos, uma vez que as taxas de propagação de trinca ainda estão no estágio de formação, onde processos de recuperação da estrutura podem ser aplicados.

A existência do  $\Delta K_{th}$  é utilizado como referência para projetos na determinação dos níveis ideais de carregamentos, podendo assim evitar a ocorrência das fraturas por fadiga sempre que os níveis de tensão desenvolvidos estiverem abaixo de  $\Delta K_{th}$ . [9,30,37,41].

Na região II, o comportamento é normalmente caracterizado por uma relação linear entre  $\log(da/dN)$  e  $\log(\Delta K)$ . Nesta região, a trinca usualmente cresce através do avanço de uma quantidade definida por ciclo da carga. Isto leva à evidência na superfície de fratura das "estrias de fadiga". [9,30,37,41].

Na região III, há uma forte aceleração do crescimento da trinca à medida em que  $K_{max}$  do ciclo de carregamento se aproxima do fator intensidade de tensão crítico  $K_c$  ou  $K_{Ic}$ ; é o estágio final da propagação da trinca. Nesta região, a fratura da amostra é similar em aparência à falha por tração. A separação ocorre entre as partículas constituintes e a matriz. [9,30,37,41].





Muitos dos problemas de propagação da trinca por fadiga resultam da impossibilidade de se evitar a sua nucleação, exigindo um controle efetivo da sua propagação na região II, com a finalidade de permitir uma programação eficaz de períodos de inspeção periódica a que a estrutura deve ser submetida.

Diversos modelos teóricos tem sido propostos para descrever o comportamento da trinca na região II, adotando-se que para esta região pode-se considerar uma relação linear entre  $\log(da/dN) \times \log(\Delta K)$ .

A proposição mais simples e conhecida é atribuída a Paris e Erdogan [39], conhecida como "lei de Paris". Este modelo é representado pela equação (3.4)

$$\frac{da}{dN} = C.(\Delta K)^n \quad (3.4)$$

Embora originalmente o modelo proposto considere os termos  $C$  e  $n$  como constantes do material, na prática observa-se que estes termos variam para um mesmo material conforme a condição de carregamento a que o mesmo esta submetida [8,33].

De um modo geral admite-se que  $C$  e  $n$  dependem do estado estrutural do material ( tamanho de grão, tratamento térmico, trabalho a frio etc ), de suas propriedades mecânicas ( limite de escoamento e tenacidade à fratura ), além das condições experimentais ( razão de carga, frequência, temperatura, carga máxima, carga mínima, presença de meio corrosivo etc ) [41].

Em 1967, R.G. Forman, V.E. Kearney e R.M. Engle [42], procurando descrever o aumento acentuado em  $(da/dN)$ , para valores elevados de  $\Delta K$  (região III da figura (3.3)) e a influência das condições de carregamento, introduziram os parâmetros  $R$  e  $K_c$  na equação de Paris, obtendo a equação (3.5).

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K} \quad (3.5)$$

onde

$$R = \text{razão de carga cíclica} \quad R = \left( \frac{K_{min}}{K_{max}} \right)$$

$K_c$  = fator crítico de intensidade de tensão crítico

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

Em 1971, W. Elber [43] observou que a trinca de fadiga

se fecha no descarregamento antes que a carga aplicada seja eliminada, isto é, ainda submetida à aplicação de tensão de tração. Este processo, denominado de fechamento da trinca induzido por plasticidade, ocorre porque o estado de tensão na ponta da trinca provoca uma zona plástica sempre crescente a sua frente; esta zona plástica vai sendo deixada para trás à medida que a trinca se propaga. Forma-se, então, um volume extra de material deformado plasticamente entre as faces da trinca, que está submetida a um campo de tensões residuais compressivas no descarregamento.





Este processo acarreta uma redução no valor de  $\Delta K$ , não existindo mais  $(K_{\max} - K_{\min})$ , mas sim  $(K_{\max} - K_{ab})$ , onde  $K_{ab}$  corresponde ao ponto a partir do qual trinca começa a se abrir.

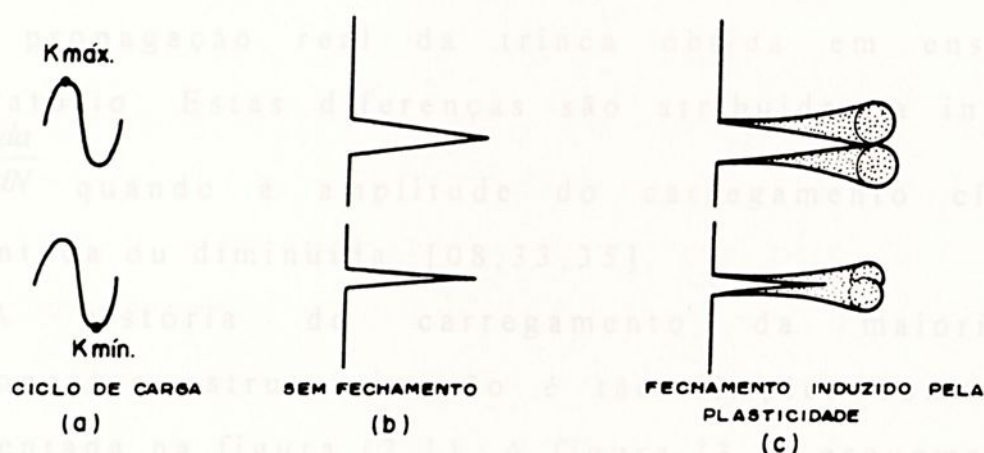
Tem-se então o  $\Delta K_{\text{efetivo}} = (K_{\max} - K_{ab})$  ou ainda  $\Delta K_{\text{efetivo}} = U \cdot \Delta K$ , onde  $U$  é fração do ciclo para o qual a trinca ainda está aberta.

As expressões (3.6) e (3.7) representam a taxa de propagação da trinca na região II, de Elber.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{ef}})^n \quad (3.6)$$

$$\frac{da}{dN} = C(U\Delta K)^n \quad (3.7)$$

Na figura (3.4) temos esquematizado o fenômeno de fechamento da trinca induzido por plasticidade. Este fenômeno é característico da região II [41].



Figura(3.4)- Mecanismo de fechamento da trinca induzido pela plasticidade [41].

Em 1976, Nelson e Fuchs [44] propuseram uma expressão que aplica as observações de Elber à equação de Forman, obtendo a equação (3.8).

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(U\Delta K)^n}{K_c - K_{max}} \quad (3.8)$$

Outros pesquisadores tem proposto novos modelos teóricos para a taxa de propagação da trinca por fadiga. Na referência [12] pode-se observar alguns e seus respectivos resultados.

### 3.3 FADIGA COM CARREGAMENTO DE AMPLITUDE VARIÁVEL

Quando o carregamento apresenta amplitude variável é observada uma diferença muito grande entre as previsões calculadas pelos modelos teóricos para amplitude constante e a propagação real da trinca obtida em ensaios de laboratório. Estas diferenças são atribuídas a interações em  $\frac{da}{dN}$  quando a amplitude do carregamento cíclico é aumentada ou diminuída [08,33,35].

A história do carregamento da maioria dos componentes estruturais não é tão simples como aquela apresentada na figura (2.1). A figura (3.5) esquematiza um carregamento mais próximo da realidade [30,41].





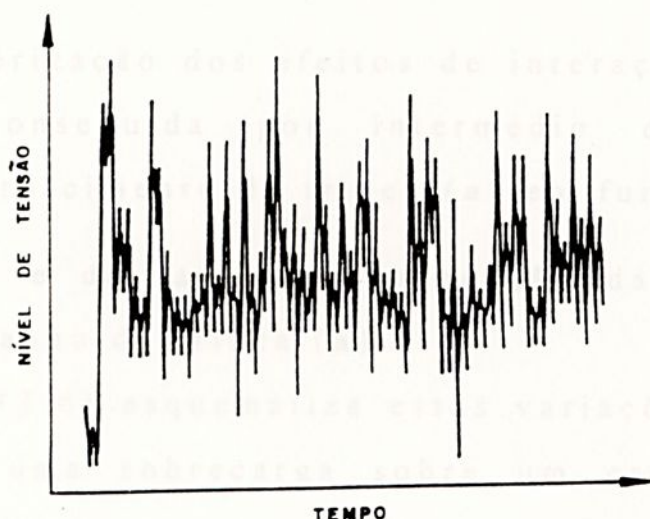


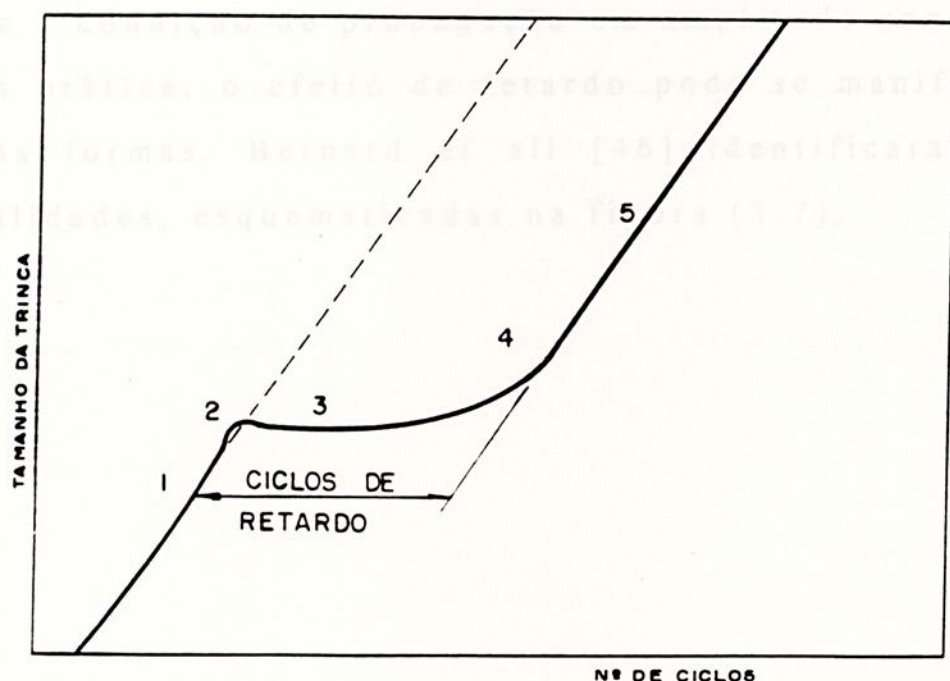
Figura 3.5- Exemplo de carregamento cíclico aleatório[41].

Qualquer que seja o histórico do carregamento considerado, verifica-se que o espectro de cargas induz diferentes efeitos de interação. Estes efeitos podem resultar em significantes acelerações e retardos na taxa de propagação da trinca.

Estes efeitos foram inicialmente observados na década de 1960, por Hudson e Hardrath [45], quando as experiências que realizavam com ligas de alumínio, mostraram que a aplicação de sobrecargas de tração poderiam diminuir a taxa de propagação da trinca, em relação a um carregamento sem sobrecarga. Teste com sequência alto-baixo de carregamento mostraram também um aumento na vida do componente, em relação a aquela esperada na soma dos crescimentos da trinca para cada ciclo, obtidos em ensaios de amplitude constante. Sendo assim, concluíram que o dano introduzido por cada ciclo de carregamento não era mais controlado apenas pela amplitude do carregamento e pela tensão média do ciclo, mas também pela história do carregamento precedente.

A caracterização dos efeitos de interação de cargas é geralmente conseguida por intermédio do estudo da evolução do crescimento da trinca ( $a$ ) em função do número de ciclos ( $N$ ) e da taxa de propagação da trinca  $\frac{da}{dN}$  em função do tamanho da trinca ( $a$ ).

A figura (3.6) esquematiza estas variações a partir da aplicação de uma sobrecarga sobre um carregamento de amplitude constante.



Figura(3.6)- A aceleração e o retardo da propagação da trinca em fadiga com carregamento de amplitude variável [41].



Na figura 3.6 podem-se identificar cinco regiões distintas:

1- Propagação da trinca em amplitude constante, antes da aplicação da sobrecarga.

2- Aplicação da sobrecarga seguida por uma imediata aceleração da trinca.

3- Diminuição gradual da taxa de propagação da trinca.

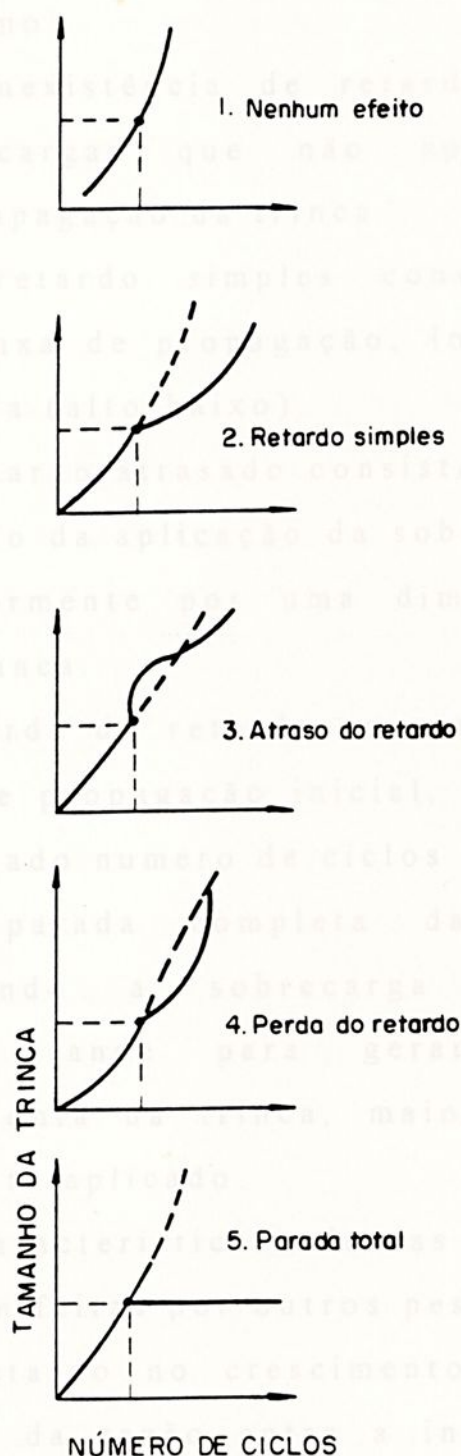
4- Região de reaceleração da taxa de propagação da trinca.

5- Propagação da trinca sem efeito de interação, retorno à condição de propagação em amplitude constante.

Na prática, o efeito de retardo pode se manifestar de diversas formas. Bernard et all [46] identificaram cinco possibilidades, esquematizadas na figura (3.7).



Figura 3.71- As diversas formas de manifestação do efeito de retardo induzido por sobrecarga [46].



Figura(3.7)- As diversas formas de manifestação do efeito do retardo induzido por sobrecarga [46].



As diversas situações listadas na figura 3.7 podem ser interpretadas como:

1- A inexistência de retardo é observada para pequenas sobrecargas que não apresentam influência detectável na propagação da trinca.

2- O retardo simples consiste na diminuição instantânea da taxa de propagação, logo após a aplicação de uma sobrecarga (alto-baixo).

3- O retardo atrasado consiste numa aceleração da trinca no momento da aplicação da sobrecarga (alto-baixo), seguido posteriormente por uma diminuição da taxa de propagação da trinca.

4- A perda do retardo representa a tendência de retorno a taxa de propagação inicial, que é reestabelecida após um determinado número de ciclos de retardo.

5- A parada completa da trinca pode ser conseguida quando a sobrecarga atinge um valor suficientemente grande para gerar um esforço de compressão na ponta da trinca, maior que o esforço de tração normalmente aplicado.

Além das características citadas outras observações importantes foram feitas por outros pesquisadores:

1- O retardo no crescimento da trinca aumenta com o aumento da razão entre a intensidade de tensão máxima da sobrecarga e a intensidade de tensão máxima do carregamento de amplitude constante [37,45,47].

2- Se a razão entre a intensidade de tensão máxima na sobrecarga e a intensidade de tensão máxima do carregamento de amplitude constante for suficientemente alta, pode ocorrer a parada total da trinca [37,45,47].



3- O retardo do crescimento da trinca ocorre devido à zona plástica existente na ponta da trinca criada pela sobrecarga [20].

4- O efeito do retardo aumenta se um bloco de sobrecargas é aplicado, quando comparado com um pulso de sobrecarga nas mesmas condições de carregamento [37,47,48].

5- O efeito do retardo aumenta quanto maior o bloco de sobrecarga, até um limite considerado como limite de saturação ou de retardo máximo para aquela condição de carregamento [37,47,48].

6- O retardo é função da ductibilidade do material. Se a ductibilidade de uma liga é controlada por tratamento térmico, um limite de escoamento menor produzirá retardos maiores [46].

O estudo de outras seqüências de carregamento mostrou que se uma seqüência descendente pode provocar o retardo da trinca, uma seqüência ascendente pode causar uma aceleração na taxa de crescimento da trinca [45,47,49].

Matthews [50] realizou testes nos quais as seqüências de carregamento eram ascendentes e verificou um aumento na taxa de propagação da trinca, de aproximadamente quatro vezes a taxa de propagação observada no nível mais alto de carregamento.

O mesmo autor verificou que esta aceleração se estabilizava rapidamente quando comparada com o efeito do retardo.

Voorwald e Torres [51] observaram que a aplicação de cargas menores que a carga de referência (subcargas),





aplicadas imediatamente após a sobrecarga, e imediatamente antes da carga de referência, produzem um efeito pouco significativo na taxa de propagação normal da trinca; porém, podem reduzir sensivelmente o efeito do retardo provocado pela aplicação da sobrecarga. Observaram, também, que a redução do efeito era tanto maior quanto maior fosse o número de ciclos da subcarga e principalmente sua amplitude.

### 3.4 MODELOS REPRESENTATIVOS DO RETARDO NA TAXA DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA POR FADIGA

Os modelos que serão agora comentados foram desenvolvidos para representar analiticamente a intensidade do retardo na propagação da trinca, devido a sobrecargas de tração aplicadas em carregamentos de amplitude variável.

#### 3.4.1- Modelo de Wheeler

A proposta de Wheeler [52] considera que a taxa de crescimento da trinca  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  pode ser representada como  $f(\Delta K)$  ou  $\left(\frac{da}{dN}\right) = C(\Delta K)^n$

Sua proposta prevê um crescimento de trinca, ciclo a ciclo, dado pela seguinte expressão:

$$a_r = a_0 + \sum_{i=1}^r \left( \frac{da}{dN} \right)_i \quad (3.10)$$



onde:

$a_r$  = comprimento da trinca após  $r$  ciclos.

$a_0$  = comprimento inicial da trinca.

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

Os efeitos do retardo são considerados, no modelo de Wheeler, pela taxa de crescimento no retardo expressa como:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{i\text{ret}} = (C_p)_i |C(\Delta K)_i^n| \quad (3.11)$$

onde:

$(C_p)_i$  = parâmetro de retardo para o ciclo  $i$ .

$(r_y)_i$  = dimensão da zona plástica.

$(a_p - a)$  = distância da ponta da trinca até a fronteira da zona plástica, causada pela última sobrecarga.

$m$  = expoente de forma da trinca.

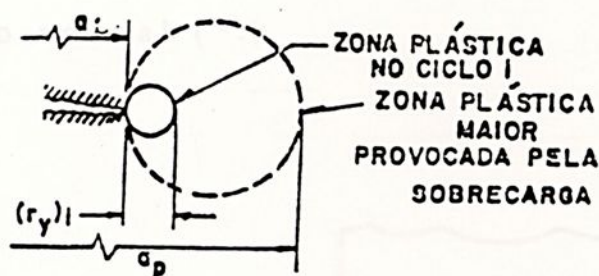
$$(C_p)_i = \left| \frac{(r_y)_i}{a_p - a} \right|^m \quad (3.12)$$

$$(r_y)_i = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \left( \frac{K_{\text{máx}}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3.13)$$



Observação:  $(C_p)_i$  pode assumir valores entre 0 e 1, indicando a parada no crescimento da trinca ou nenhum retardo.

Os parâmetros envolvidos neste modelo podem ser observados na figura (3.8).



Figura(3.8)- Modelo de Wheeler para retardo [52].

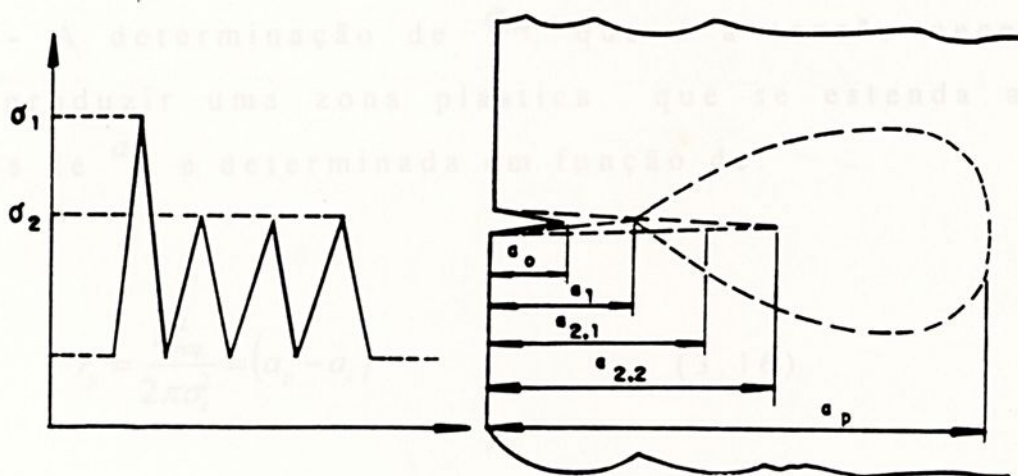
Neste modelo, o retardo acaba quando o contorno da zona plástica no ciclo  $i$  atinge o limite da zona plástica devido à sobrecarga, e é máximo imediatamente após a aplicação da sobrecarga de tração.

Este modelo tem o inconveniente de requerer o conhecimento prévio dos dados obtidos no ensaio para então se encontrar o expoente " $m$ ".

### 3.4.2- Modelo de Willenborg

Para Willenborg [53], o retardo é obtido através da determinação de um valor  $\Delta K$  efetivo que é então aplicado na equação de carregamento de amplitude constante, proposta por Forman.

Vai-se considerar o carregamento representado na figura (3.9), para dois níveis de tensão, um pico de sobrecarga ( $\sigma_1$ ) e em seguida retornando ao nível de carregamento normal ( $\sigma_2$ ).



Figura(3.9)-Modelo de Willenborg: carregamento e retardo [53].

O desenvolvimento para a obtenção de  $\Delta K$  efetivo é feito seguindo as seguintes etapas:

Considerando o espectro de carregamento conforme ilustrado na figura (3.9), tem-se:



1- A sobrecarga  $\sigma_1$  é aplicada e a zona plástica criada por  $\sigma_1$  é calculada por:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_e}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{2(a_p - a_1)}{a_1}} \quad (3.14)$$

$$a_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_e^2} + a_1 \quad (3.15)$$

2- O primeiro ciclo de tensão  $\sigma_2$  do segundo nível é aplicado  $\Rightarrow$  Se  $\sigma_2 < \sigma_1$ , o modelo de retardo é aplicado.

3- A determinação de  $\sigma_{req}$ , que é a tensão necessária para produzir uma zona plástica que se estenda até os limites de  $a_p$ , é determinada em função de:

$$r_y = \frac{K_{req}^2}{2\pi\sigma_e^2} = (a_p - a_c) \quad (3.16)$$

ou

$$\sigma_{req.} = \frac{\sigma_e}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{2(a_p - a_c)}{a_c}} \quad (3.17)$$

onde:

$a_c$  = comprimento da trinca no início da aplicação de um ciclo de ordem  $i$  do segundo nível de tensão.

Para o ciclo  $i=1$  temos  $a_c$  igual a  $a_1$ , resultando em:

$$\sigma_{req.} = \frac{\sigma_e}{\beta} \cdot \sqrt{\frac{2(a_p - a_1)}{a_1}} \quad (3.18)$$

Portanto,  $\sigma_{req.}$  no primeiro ciclo, do segundo nível de carga, torna-se igual ao valor da sobrecarga  $\sigma_1$ .

4- O modelo de Willenborg considera que o valor de  $K_{max.}$  sofre redução de uma quantidade  $K_{red.}$  devido ao ingresso da trinca na zona plástica criada pela sobrecarga, ou seja:

$$K_{red.} = K_{req.} - K_{max.2.i} \quad (3.19)$$

A equação (3.19) indica que a intensidade da tensão residual seja dada por:

$$\sigma_{red.} = \frac{K_{req.}}{\beta \sqrt{\pi a_{2.i}}} - \frac{K_{max.2.i}}{\beta \sqrt{\pi a_{2.i}}} \quad (3.20)$$

Para o primeiro ciclo de tensão do segundo nível, tem-se:

$$K_{red.} = K_{req.} - K_{max.2.1} \quad (3.21)$$

Quando a trinca se propagar 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  $K_{max}$  e  $K_{min}$  aplicados no segundo nível de tensão serão calculados como mostrado a seguir:

$$K_{max.ef.2,i} = K_{max.2,i} - K_{red.} \quad (3.22)$$

$$K_{max.ef.2,i} = 2K_{max.2,i} - K_{req.} \quad (3.23)$$

$$K_{min.ef.2,i} = K_{min.2,i} - K_{red.} \quad (3.24)$$

$$K_{min.ef.2,i} = K_{min.2,i} + K_{max.2,i} - K_{req.} \quad (3.25)$$

Se  $K_{max.ef.}$  ou  $K_{min.ef.}$  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 representado na figura (3.10).

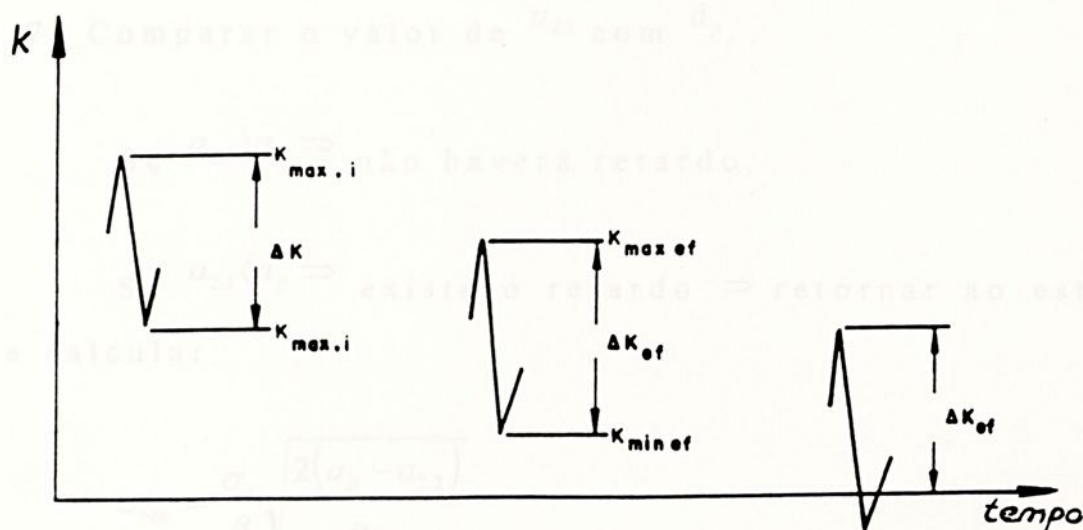


Figura 3.10- Representação do  $\Delta K_{ef.}$ , para Willenborg [53].

6- Os valores de  $\Delta K_{ef.}$  e de  $R_{ef.}$  são calculados conforme segue:

$$\Delta K_{ef.2,i} = K_{max.ef.2,i} - K_{min.ef.2,i} \quad (3.26)$$

$$R_{ef.2,i} = \frac{K_{min.2,i} - K_{red.}}{K_{max.2,i} - K_{red.}} = \frac{K_{min} + K_{max.2,i} - K_{req.}}{2K_{max.2,i} - K_{req.}} \quad (3.27)$$

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

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K_{ef.})^n}{(1-R_{ef.})K_c - \Delta K_{ef.}} \quad (3.28)$$

Ao final do primeiro ciclo do segundo nível obtém-se  $a_{2,1}$ .

7- Comparar o valor de  $a_{2,1}$  com  $a_p$ .

Se  $a_{2,1} > a_p \Rightarrow$  não haverá retardo.

Se  $a_{2,1} < a_p \Rightarrow$  existe o retardo  $\Rightarrow$  retornar ao estágio

(3) e calcular:

$$\sigma_{req.} = \frac{\sigma_e}{\beta} \sqrt{\frac{2(a_p - a_{2,2})}{a_{2,2}}} \quad (3.29)$$

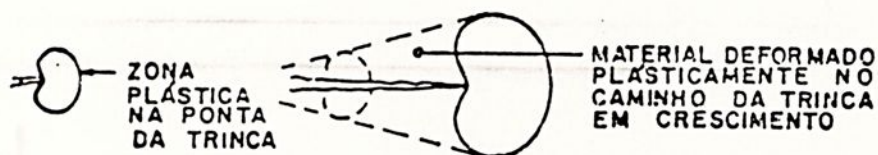
Pode ser observado que  $\sigma_{req.}$  decresce à medida que  $a_c$  se aproxima de  $a_p$ . Quando  $\sigma_{req.} = \sigma_{max.2,1}$  resulta  $\sigma_{red.} = 0$  e o retardo não mais será aplicado.





### 3.4.3- Modelo de Elber

Este modelo foi desenvolvido baseado nas observações de Elber, que verificou o fechamento da trinca quando o carregamento era ainda de tração e que a mesma não se abria novamente até que altas cargas de tração fossem aplicadas [43]. Figura (3.11).



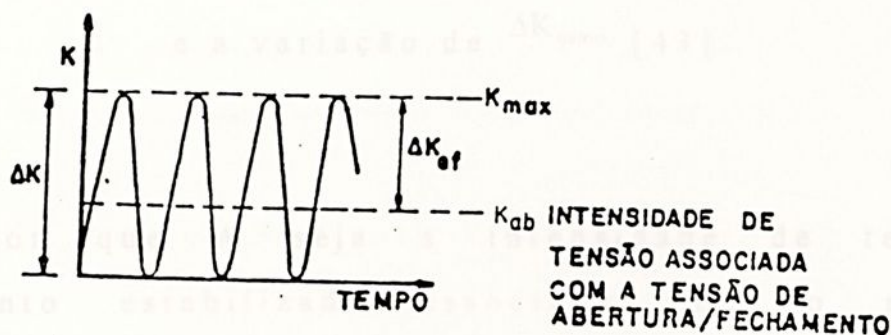
Figura(3.11)- Modelo de Elber - zona plástica na ponta da trinca [43].

O significado físico do comportamento do fechamento da trinca pode ser explicado por:

1- Uma zona plástica está sempre presente ao redor da ponta da trinca, como mostrado na figura (3.11). Como a trinca cresce através de uma sucessão destas zonas, forma-se um "envelope" de material deformado plasticamente que é deixado no caminho da fissura.

2- Tensões residuais devido à deformação e às correspondentes tensões residuais de compressão estão presentes nestes "envelopes". As tensões residuais devido à deformação causam o fechamento da trinca.

Elber propôs que, se a trinca está aberta somente durante um intervalo do ciclo de carregamento de tensão, então o crescimento da trinca deveria ser correlacionado com o limite intensidade de tensão efetiva  $\Delta K_{\text{ef.}} = K_{\text{max.}} - K_{\text{ab.}}$ , conforme a figura (3.12).

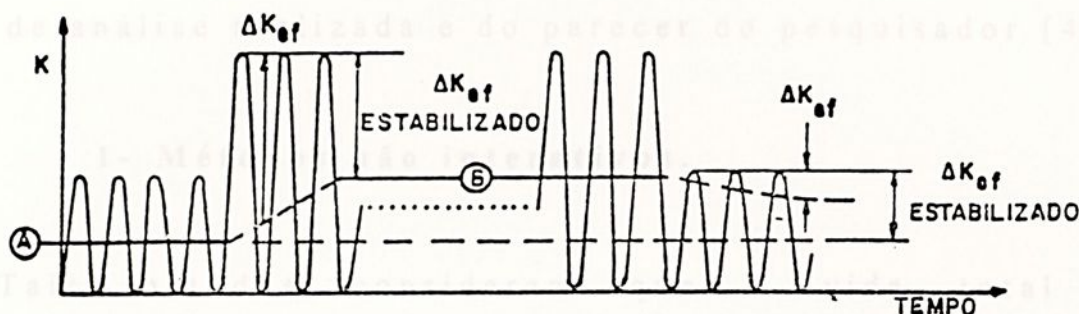


Figura(3.12)-Modelo de Elber-  $\Delta K_{\text{efenvo.}}$  [43].

O conceito de intensidade de tensão efetiva tem o objetivo de explicar os efeitos de interação observados quando se trabalha com carregamento de amplitude variável.

O fechamento da trinca pode ser representado tanto no efeito de retardo como de aceleração da taxa de crescimento da trinca, como pode ser observado na figura (3.13).





Figura(3.13)- Modelo de Elber- O fechamento da trinca e a variação de  $\Delta K_{efetivo}$ . [43].

Supor que A seja a intensidade de tensão de fechamento estabilizada associada com o nível de carregamento mais baixo e que B seja a intensidade de tensão de fechamento estabilizado associado com o nível de carregamento mais alto.

Na transição do carregamento ascendente ( $A \Rightarrow B$ ),  $\Delta K_{efetivo}$ , para o nível mais alto, será temporariamente maior do que o valor de  $\Delta K_{efetivo}$  estabilizado para B, causando assim uma aceleração na taxa de propagação da trinca.

Na transição do carregamento descendente ( $B \Rightarrow A$ ), o valor de  $\Delta K_{efetivo}$  para o nível de carregamento mais baixo será temporariamente menor do que o valor de  $\Delta K_{efetivo}$  estabilizado para A, causando assim um retardo na taxa de propagação da trinca.

### 3.4.4- Outros métodos de análise

Outros métodos de análise e predição do crescimento da trinca são usados e podem ser divididos em função do tipo de análise realizada e do parecer do pesquisador [48].

#### 1- Métodos não interativos.

Tais métodos consideram que a vida total do componente é resultado do somatório dos ciclos gastos nos diferentes níveis de tensão e emprega expressões para carregamentos de amplitude constante. Os efeitos de interação não são considerados, resultando em estimativas de vida muito conservativas dos componentes.

#### 2- Ajuste de dados experimentais.

Este método procura representar o retardo na propagação da trinca por fadiga através de regressão de múltiplas variáveis.

A expressão geral é do seguinte tipo:

$$NR = K(L)^a \cdot (M)^b \cdot (N)^c \quad (3.30)$$

onde:

**NR** = número de ciclos de retardo.

**L, M, N** = variáveis que influenciam no retardo.

**K, a, b, c** = constantes determinadas experimentalmente.



### 3- Baseado no conceito de $K_{equivalente}$

O método procura, através da análise estatística do espectro de cargas, determinar um  $\Delta K_{equivalente}$ , que aplicado a uma equação de amplitude constante, e que represente o comportamento geral da trinca.

Um dos métodos utiliza a raiz quadrada média (r.m.s.) do espectro de carga, ou seja,  $\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{(r.m.s.)}, R_{(r.m.s.)})$  [54].

As tensões máximas e mínimas para este método podem ser calculadas por:

$$\sigma_{max.rms.} = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m (\sigma_{max.})^2 \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

$$\sigma_{min.rms.} = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m (\sigma_{min.})^2 \right|^{\frac{1}{2}} \quad (3.32)$$

Nas expressões (3.31) e (3.32),  $\sigma_{max.}$  e  $\sigma_{min.}$ , são respectivamente, as tensões máximas e mínimas e  $M$  é o número total de valores de  $\sigma_{max.}$  e  $\sigma_{min.}$ .

Uma vez calculado os valores de  $\sigma_{max.rms.}$  e  $\sigma_{min.rms.}$ , pode ser determinada a razão de tensão raiz quadrada média,  $R_{rms.}$ , através da expressão:

$$R_{rms} = \frac{\sigma_{min.rms.}}{\sigma_{max.rms.}} \quad (3.33)$$



e a variação do fator intensidade de tensão,  $\Delta K_{rms}$ :

$$\Delta K_{rms} = K_{max.rms} - K_{min.rms} \tag{3.34}$$

Observação: Este método tem apresentado bons resultados para carregamentos aleatórios [54].

4.1- MATERIAL

4- Métodos baseados nos conceitos de  $K_{efetivo}$ .

Calcula-se para cada ciclo,  $K_{efetivo}$  e  $R_{efetivo}$  considerando-se os efeitos da região plástica na ponta da trinca. Os modelos de Willenborg [53], Elber [43] e Wheeler [55], podem ser enquadrados neste método.

Tabela(4.1)-Composição Química da Liga 7075-T761

| Elemento Químico | Zn   | Mg   | Cu   | Fe   | Mn   | Cr   | Si     | Al       |
|------------------|------|------|------|------|------|------|--------|----------|
| Especificado     | 5,10 | 1,90 | 1,25 | 0,12 | 0,05 | 0,15 | 0,10   |          |
| peça             | a    | a    | a    |      |      |      |        | Restante |
| AMS 4085 [96]    | 6,20 | 2,60 | 1,90 | máx. | máx. | 0,25 | máx.   |          |
| Encontrado       |      |      |      |      |      |      |        |          |
| na               | 5,76 | 1,05 | 1,35 | 0,10 | 0,02 | 0,24 | Traces | Ok       |
| Amostra          |      |      |      |      |      |      |        |          |





## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 4.1- MATERIAL

O desenvolvimento experimental do trabalho foi realizado com uma liga de alumínio de alta resistência 7475-T761, na forma de chapa, com espessura de 4,15 mm. O material foi fornecido pela EMBRAER.

A tabela (4.1) - apresenta a composição química esperada conforme [AMS4085][14] e a encontrada nos corpos de prova utilizados. À análise química foi realizada pela EMBRAER.

Tabela(4.1)-Composição Química da Liga 7475-T761.

| Elemento Químico    | Zn          | Mg          | Cu          | Fe          | Mn          | Cr          | Si            | Al              |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-----------------|
| <b>Especificado</b> | <b>5,20</b> | <b>1,90</b> | <b>1,20</b> | <b>0,12</b> | <b>0,06</b> | <b>0,18</b> | <b>0,10</b>   | <b>Restante</b> |
| <b>pela</b>         | <b>a</b>    | <b>a</b>    | <b>a</b>    |             |             |             |               |                 |
| <b>AMS 4085 [%]</b> | <b>6,20</b> | <b>2,60</b> | <b>1,90</b> | <b>máx.</b> | <b>máx.</b> | <b>0,25</b> | <b>máx</b>    |                 |
| <b>Encontrado</b>   |             |             |             |             |             |             |               | <b>Ok</b>       |
| <b>na</b>           | <b>5,76</b> | <b>2,05</b> | <b>1,35</b> | <b>0,10</b> | <b>0,02</b> | <b>0,24</b> | <b>Traços</b> |                 |
| <b>Amostra</b>      |             |             |             |             |             |             |               |                 |



## 4.2- CORPOS DE PROVA

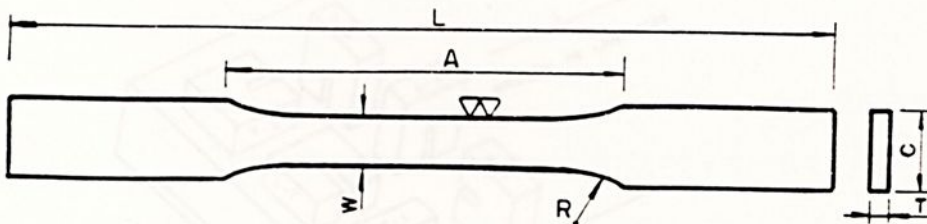
### 4.2.1- Corpo de prova para o ensaio de tração

Os corpos de prova para ensaio de tração foram confeccionados de acordo com a ASTM-E8-90a.

A tabela (4.2) e a figura (4.1) mostram as dimensões e a forma dos corpos de prova que foram utilizados.

Tabela(4.2)-Dimensões dos corpos de prova para tração.

| Referências       | L               | A             | W               | R             | C             | T    |
|-------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|------|
| Dimensões<br>(mm) | 225,0<br>± 25,0 | 90,0<br>± 5,0 | 12,25<br>± 0,25 | 13,0<br>± 1,0 | 20,0<br>± 2,0 | 4,15 |



Figura(4.1)-Forma dos corpos de prova para tração.



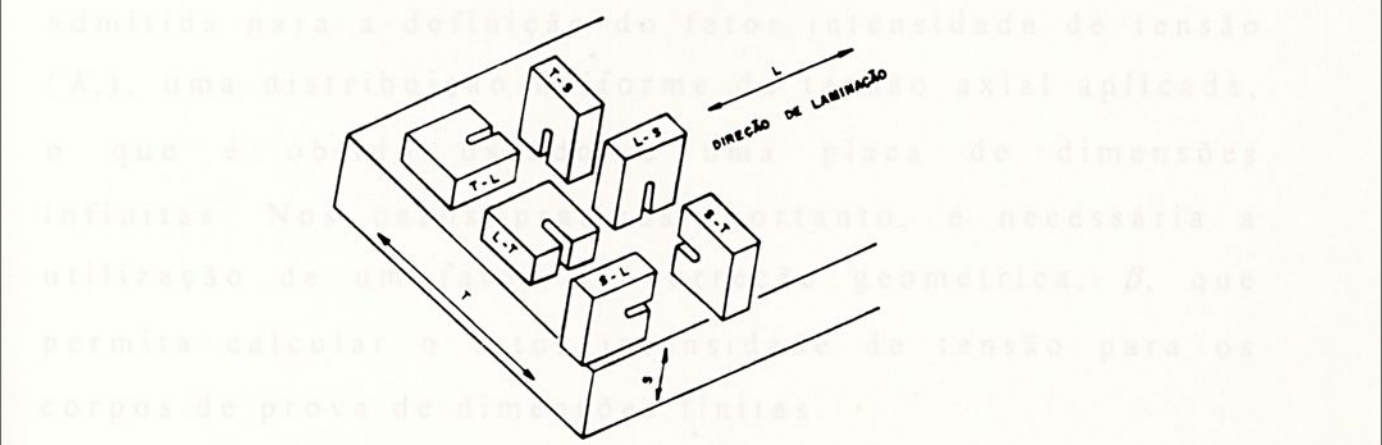
Na Tabela (4.3) estão indicadas as propriedades mecânicas da liga de alumínio 7475-T761 usada [14]. Os ensaios mecânicos foram realizados na EMBRAER.

Tabela(4.3)-Propriedades mecânicas- liga 7475-T761.

| Propriedades Mecânicas da Liga Al 7475 - T761 |              |        |            |
|-----------------------------------------------|--------------|--------|------------|
|                                               | Especificado |        | Encontrado |
|                                               | Máximo       | Mínimo |            |
| Limite de Escoamento (MPa)                    | 441          | 421    | 441,8      |
| Resistência a Tração (Mpa)                    | 503          | 490    | 497,3      |
| Alongamento (%)                               |              | 9      | 10,9       |

#### 4.2.2 - Corpo de prova para o ensaio de fadiga

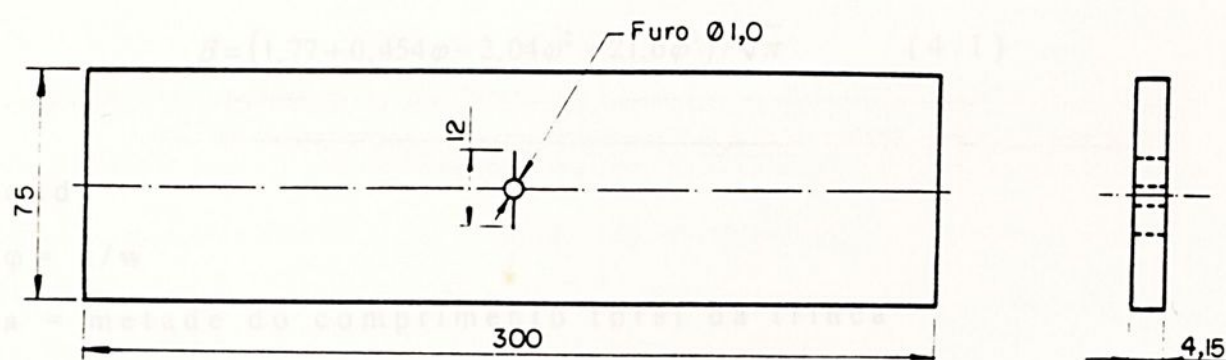
Os corpos de prova utilizados no trabalho foram confeccionados conforme as recomendações dimensionais da ASTM-E647-88a [60], com entalhe central segundo a direção L-T, que pode ser observada na figura (4.2).



Figura(4.2)- Códigos de orientação do plano da trinca[30]

A forma e as dimensões dos corpos de prova estão indicados na figura (4.3).

Com este tipo de corpo de prova são nucleadas trincas que se propagam em sentidos opostos, permitindo a obtenção de duas curvas  $a$  versus  $N$  para cada ensaio realizado.



Figura(4.3)-Forma e dimensões (mm) do corpo de prova de fadiga.

No desenvolvimento teórico da mecânica da fratura é admitida para a definição do fator intensidade de tensão ( $K_I$ ), uma distribuição uniforme da tensão axial aplicada, o que é obtido usando-se uma placa de dimensões infinitas. Nos casos práticos, portanto, é necessária a utilização de um fator de correção geométrica,  $\beta$ , que permita calcular o fator intensidade de tensão para os corpos de prova de dimensões finitas.



Para os corpos de prova com entalhe central, existem diversas expressões que podem ser usadas.

Uma solução numérica, proposta por Federsen [27], para o fator de correção geométrica,  $\beta$ , é dada na equação (4.1).

Neste trabalho será utilizada esta equação, nos cálculos envolvendo  $K_t$ .

$$\beta = (1,77 + 0,454\phi - 2,04\phi^2 + 21,6\phi^3) / \sqrt{\pi} \quad (4.1)$$

onde

$$\phi = a/w$$

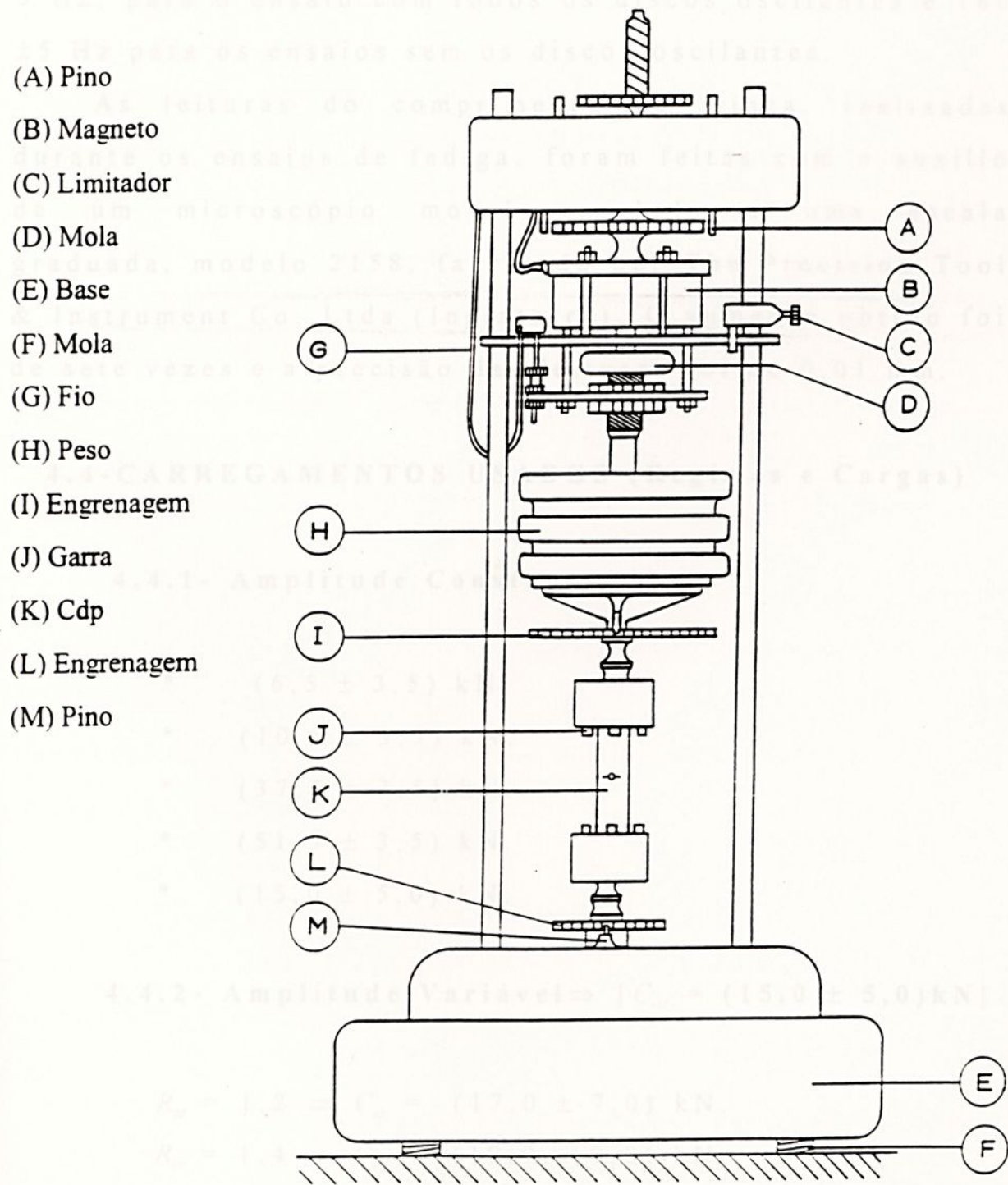
$a$  = metade do comprimento total da trinca

$w$  = largura do CDP.

#### 4.3- ENSAIOS: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratório de Estruturas do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em um equipamento AMSLER modelo JOHFP422, de fabricação Suíça, com capacidade de carga de 10tf. O princípio de funcionamento é o de ressonância magnética, na qual a frequência do ensaio coincide com a frequência natural dos elementos ensaiados e dos discos oscilantes que compõem o equipamento; a frequência do ensaio dependerá do tamanho e da rigidez elástica do corpo de prova e da quantidade de discos oscilantes contida no equipamento durante o ensaio.

A variação da frequência do ensaio é função da remoção ou colocação dos discos, conforme pode ser observado na figura (4.4).



Figura(4.4)- Esquema da máquina de fadiga [61].



Neste trabalho foram usadas as frequências extremas do equipamento, com 3 discos oscilantes e sem os discos. As frequências obtidas nos ensaios corresponderam a  $90 \pm 5$  Hz, para o ensaio com todos os discos oscilantes e  $180 \pm 5$  Hz para os ensaios sem os discos oscilantes.

As leituras do comprimento da trinca, realizadas durante os ensaios de fadiga, foram feitas com o auxílio de um microscópio móvel acoplado a uma escala graduada, modelo 2158, fabricado por The Precision Tool & Instrument Co. Ltda (Inglaterra). O aumento obtido foi de sete vezes e a precisão das leituras foi de 0,01 mm.

#### 4.4-CARREGAMENTOS USADOS (Regimes e Cargas)

##### 4.4.1- Amplitude Constante

\*  $(6,5 \pm 3,5)$  kN.

\*  $(10,5 \pm 3,5)$  kN.

\*  $(37,5 \pm 3,5)$  kN.

\*  $(51,5 \pm 3,5)$  kN.

\*  $(15,0 \pm 5,0)$  kN.

##### 4.4.2- Amplitude Variável $\Rightarrow [C_{ref} = (15,0 \pm 5,0) \text{ kN}]$

$R_{sc} = 1,2 \Rightarrow C_{sc} = (17,0 \pm 7,0)$  kN.

$R_{sc} = 1,4 \Rightarrow C_{sc} = (19,0 \pm 9,0)$  kN.

$R_{sc} = 1,6 \Rightarrow C_{sc} = (21,0 \pm 11,0)$  kN.

$R_{sc} = 1,8 \Rightarrow C_{sc} = (23,0 \pm 13,0)$  kN.

$R_{sc} = 2,0 \Rightarrow C_{sc} = (25,0 \pm 15,0)$  kN.



## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 - PROGRAMAS DE TRABALHO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados dois programas de ensaios com o objetivo de estudar as características do material, avaliar a taxa de propagação da trinca, avaliar o efeito da frequência do carregamento sobre as condições de propagação da trinca, a intensidade do retardo gerado por carregamentos de amplitude variável e comparar os dados experimentais sob carregamento constante com o modelagem teórica proposta por Paris [39].

a) O primeiro programa de ensaios foi composto de ensaios de fadiga com carregamento cíclico de amplitude constante para diversos níveis de carregamento, nas frequências de 90 Hz e 180 Hz. Este programa foi dividido em dois programas de estudo.

a.1- O primeiro programa de estudo teve o objetivo de analisar o comportamento do material base e de relacionar os dados experimentais com a modelagem teórica proposta por Paris, verificando o seu comportamento para a liga de alumínio 7475-T761.

a.2- O segundo programa de estudo teve o objetivo de analisar o efeito da frequência do carregamento sobre a taxa de propagação da trinca.

b) O segundo programa de ensaios foi composto de ensaios de fadiga com carregamento cíclico de amplitude





variável, com o objetivo de se comparar o efeito de 1 pico e de blocos de sobrecargas no fenômeno de retardo para diversas razões de carregamento.

## 5.2- PRIMEIRO PROGRAMA DE ENSAIOS

Foram realizados ensaios de fadiga com carregamento cíclico de amplitude constante, para vários níveis de carregamento e tiveram por objetivo obter dados para caracterizar o material.

Devido à diversidade de parâmetros envolvidos nos ensaios de fadiga foram fixadas algumas condições para os ensaios, com o objetivo de minimizar o número de variáveis e permitir uma análise dos fatores envolvidos no mecanismo de propagação de trinca na liga 7475-T761.

Todos os corpos de prova ensaiados foram retirados de uma mesma chapa do material, segundo a posição L-T, o que garante a homogeneidade dos parâmetros diretamente relacionados à composição química e arranjo estrutural do material.

Os corpos de prova testados tinham as mesmas dimensões e foram testados sob as mesmas condições de equipamento e ambiente.

Os ensaios realizados neste primeiro programa foram executados mantendo-se a amplitude do carregamento constante e variando-se os níveis do carregamento para permitir uma análise sob condições diferentes e extremas de carregamento.

Todos os ensaios foram conduzidos até a ruptura do material.



Os números de ciclos experimentais para as condições de carregamento constante, até a fratura dos corpos de prova, podem ser observados na tabela (5.1).

Tabela (5.1)- Número de ciclos até a fratura dos corpos de prova para carregamento constante

| Carregamento [kN] |      | $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ | Frequência | Número de Ciclos       |
|-------------------|------|-----------------------------------------|------------|------------------------|
| máx.              | mín. |                                         | [Hz]       | de Fratura             |
| 10                | 3    | 0,30                                    | 90         | 1464,0. 0 <sup>3</sup> |
|                   |      |                                         | 180        | 1275,9. 0 <sup>3</sup> |
|                   |      |                                         |            |                        |
| 14                | 7    | 0,50                                    | 90         | 935,9. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         | 180        | 800,7. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         |            |                        |
| 41                | 34   | 0,83                                    | 90         | 394,0. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         | 180        | 347,8. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         |            |                        |
| 55                | 48   | 0,87                                    | 90         | 244,4. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         | 180        | 235,0. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         |            |                        |
| 20                | 10   | 0,50                                    | 90         | 239,0. 0 <sup>3</sup>  |
|                   |      |                                         | 180        | 229,0. 0 <sup>3</sup>  |





Os ensaios do primeiro programa de ensaios foram realizados nas frequências de 90 Hz e 180 Hz.

As frequências de 90Hz e 180Hz, correspondem as frequências mínima e máxima, possíveis de serem obtidas no equipamento, para as condições dos ensaios realizados.

As curvas comprimento de trinca (a) por número de ciclos (N) até a ruptura, para os carregamentos de amplitude constante podem ser observadas nas figuras de (5.1) até (5.10).

Cada um dos ensaios realizados forneceu pontos experimentais para duas curvas a versus N.

As cargas usadas no primeiro programa de ensaios foram:

(6,5±3,5) kN.

(10,5±3,5) kN.

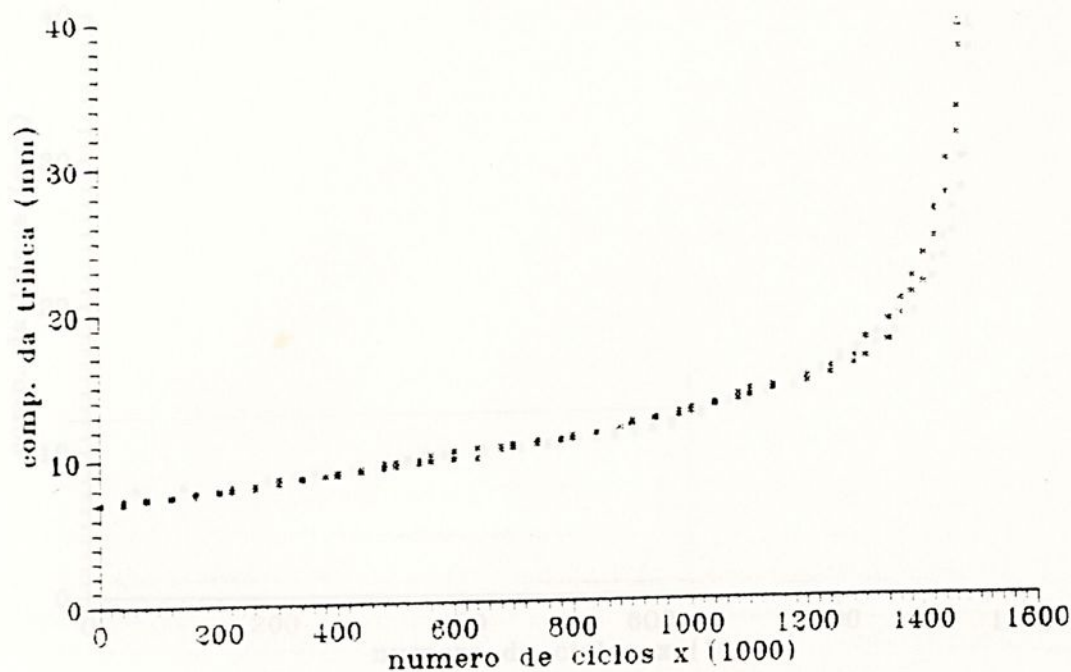
(37,5±3,5) kN.

(51,5±3,5) kN.

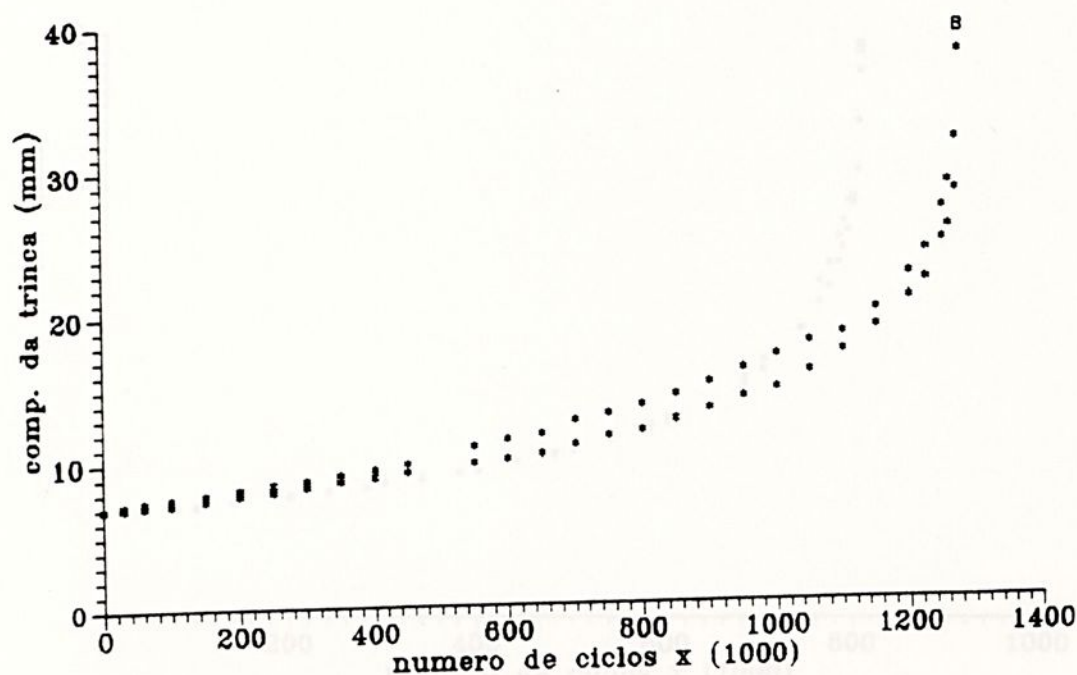
(15,0±5,0) kN.

Uma vez definidas as cargas de ensaio, utiliza-se os resultados para comparar os dados experimentais, com as previsões de comportamento calculadas pela equação de Paris.



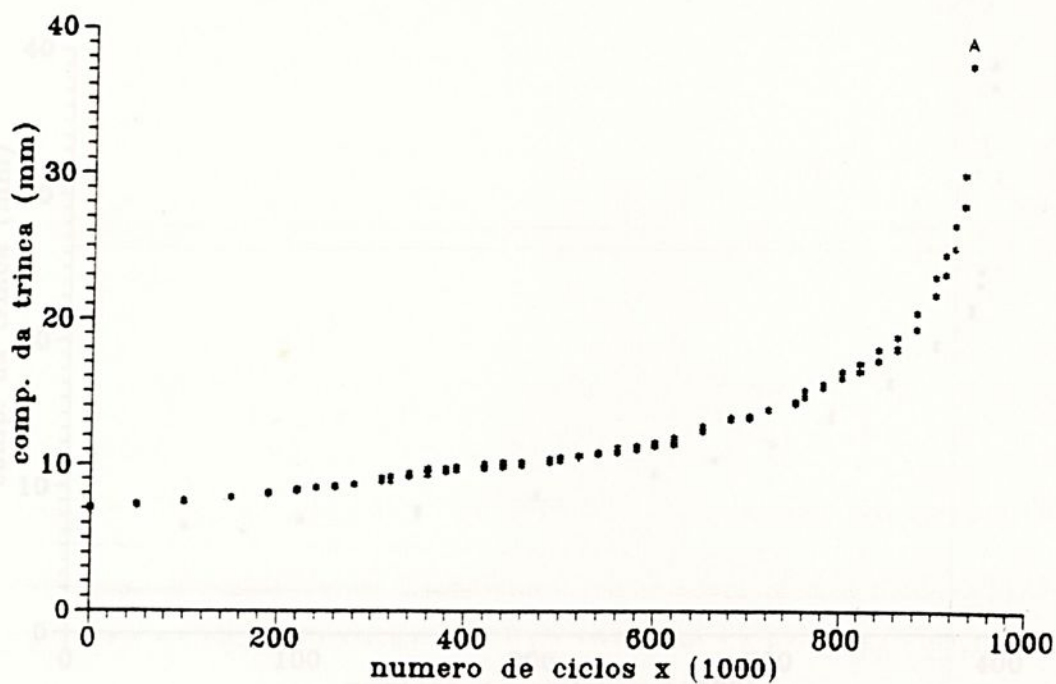


Figura(5.1)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(6,5 \pm 3,5)$  kN e freq. = 90 Hz

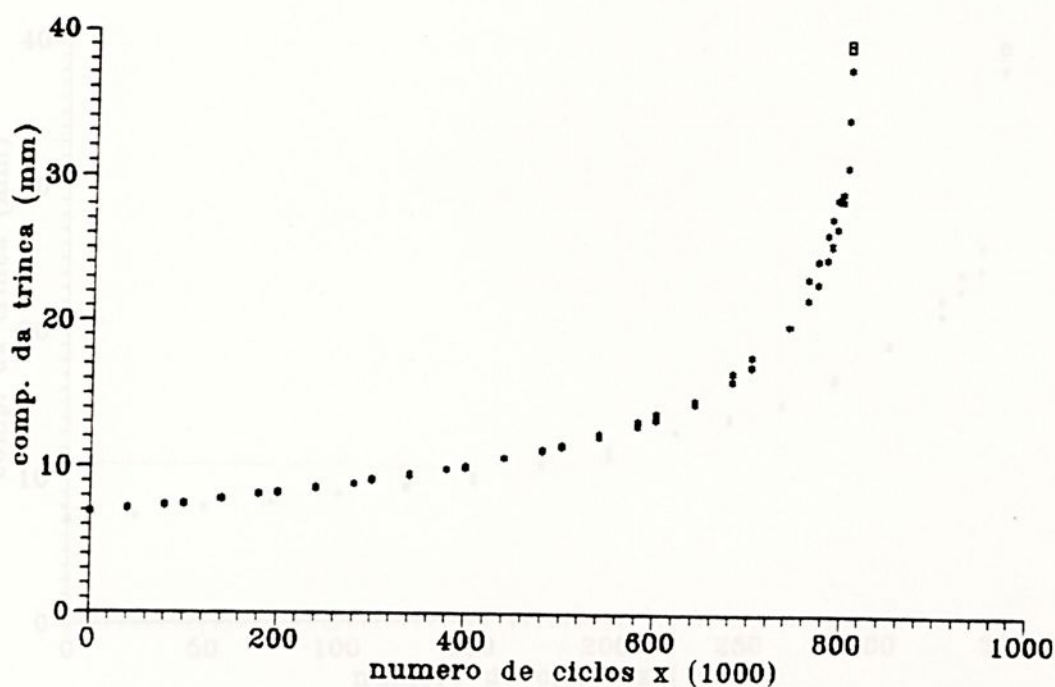


Figura(5.2)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(6,5 \pm 3,5)$  kN e freq. = 180 Hz

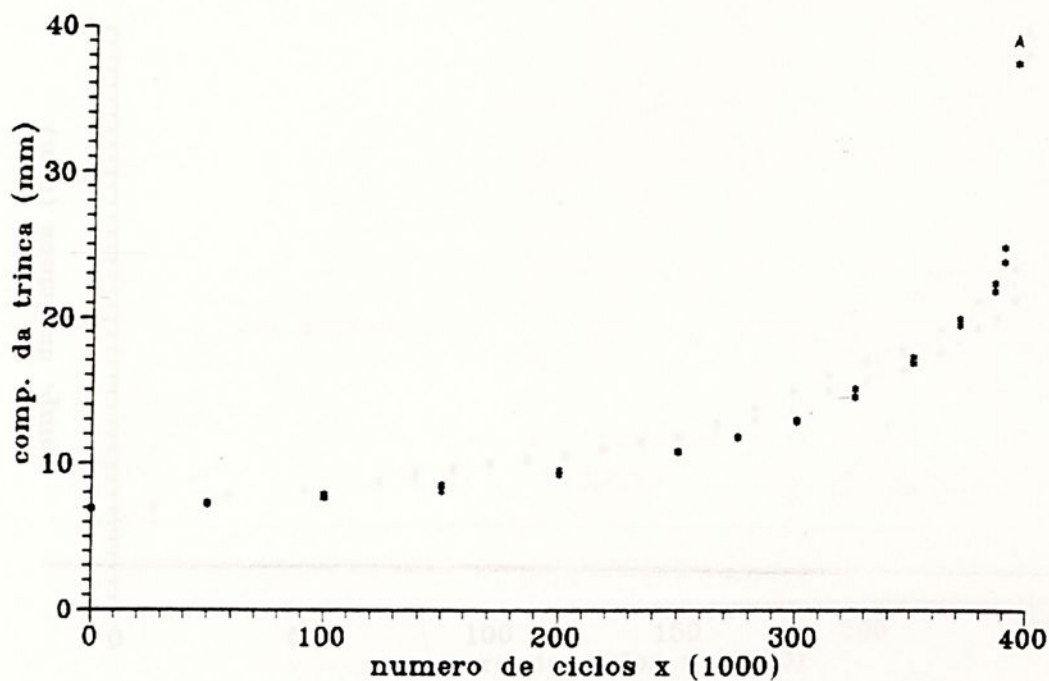




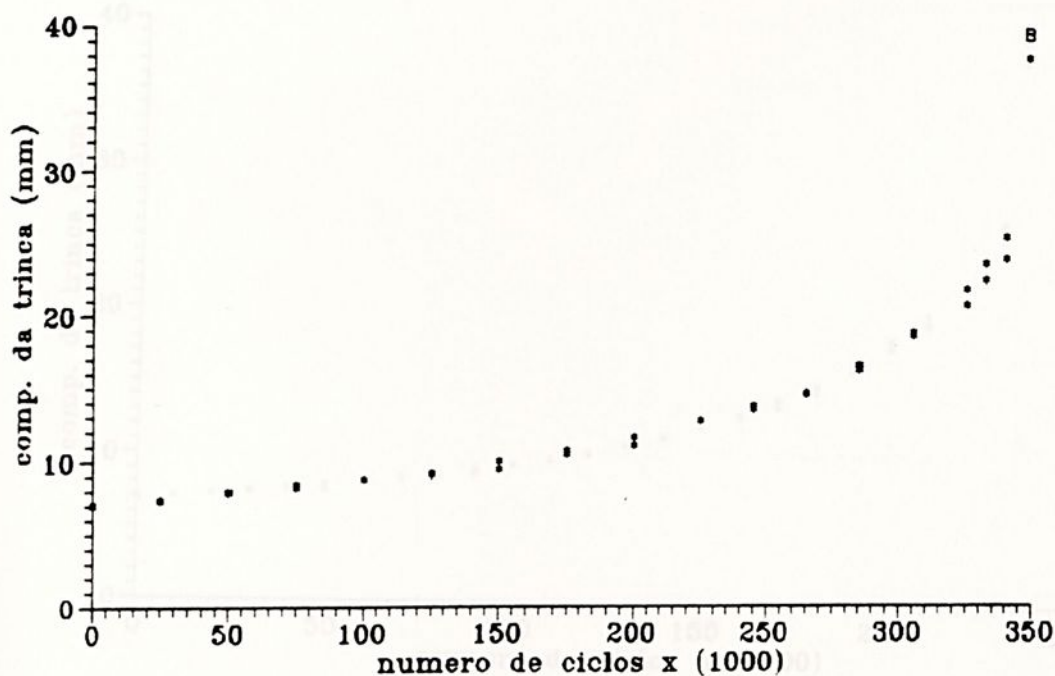
Figura(5.3)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(10,5 \pm 3,5)$  kN e freq.= 90 Hz



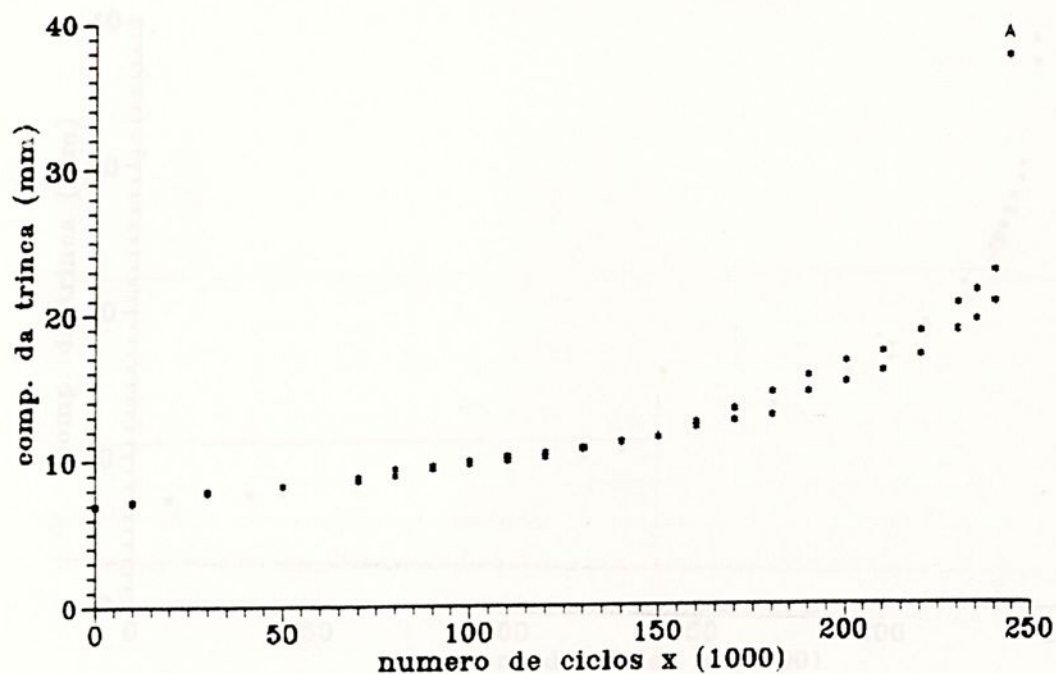
Figura(5.4)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(10,5 \pm 3,5)$  kN e freq.= 180 Hz



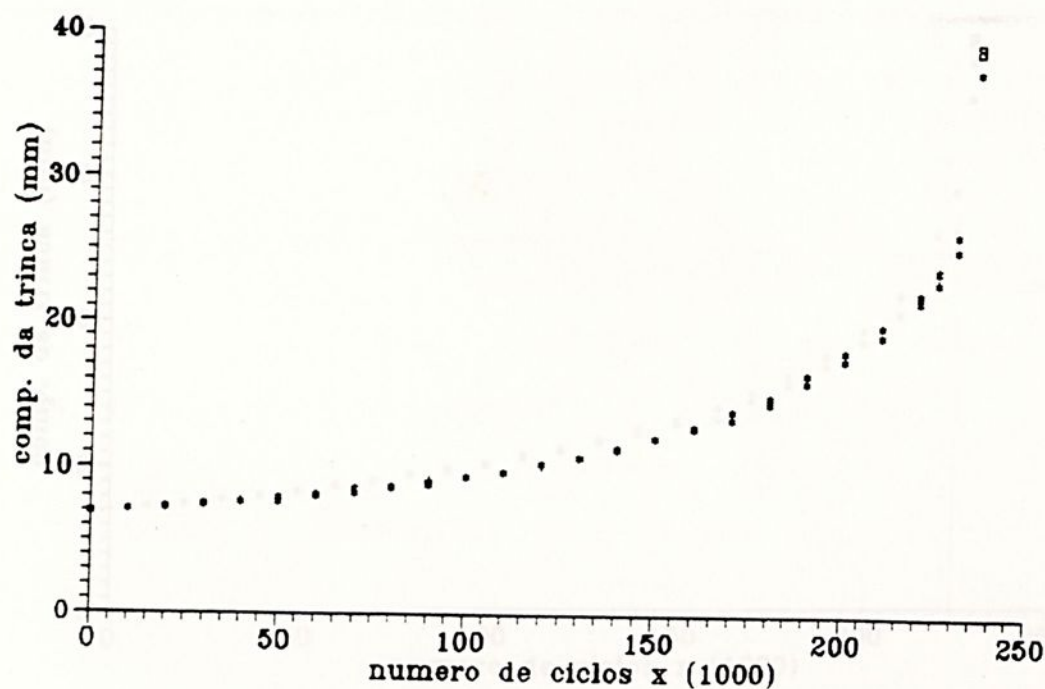
Figura(5.5)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(37,5 \pm 3,5)$  kN e freq. = 90 Hz



Figura(5.6)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(37,5 \pm 3,5)$  kN e freq. = 180 Hz

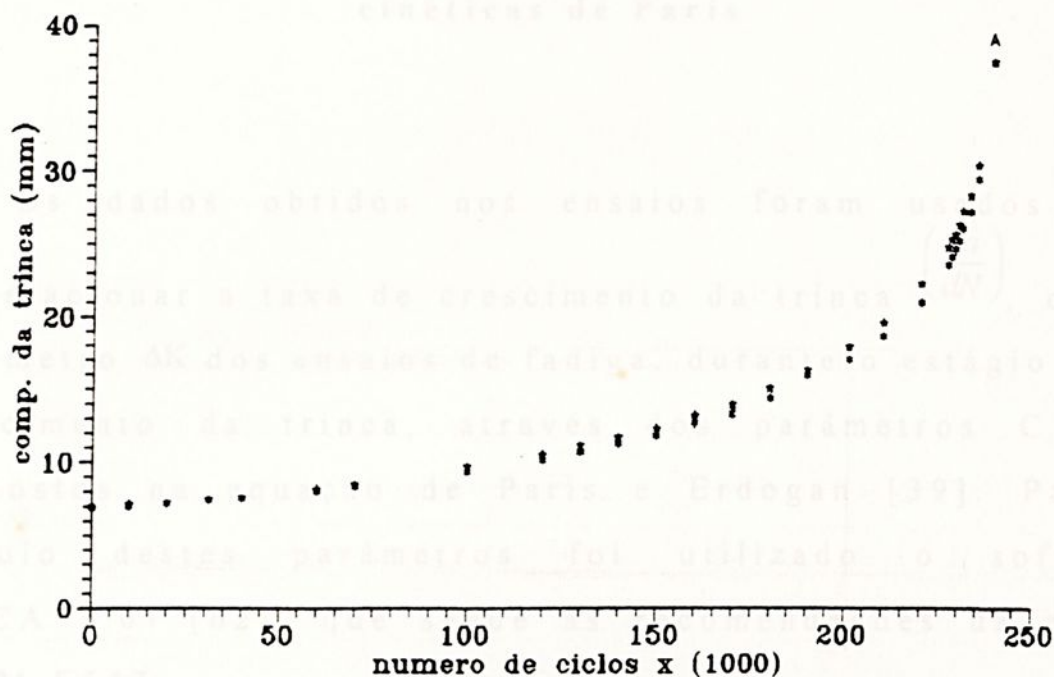


Figura(5.7)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(51,5 \pm 3,5)$  kN e freq. = 90 Hz

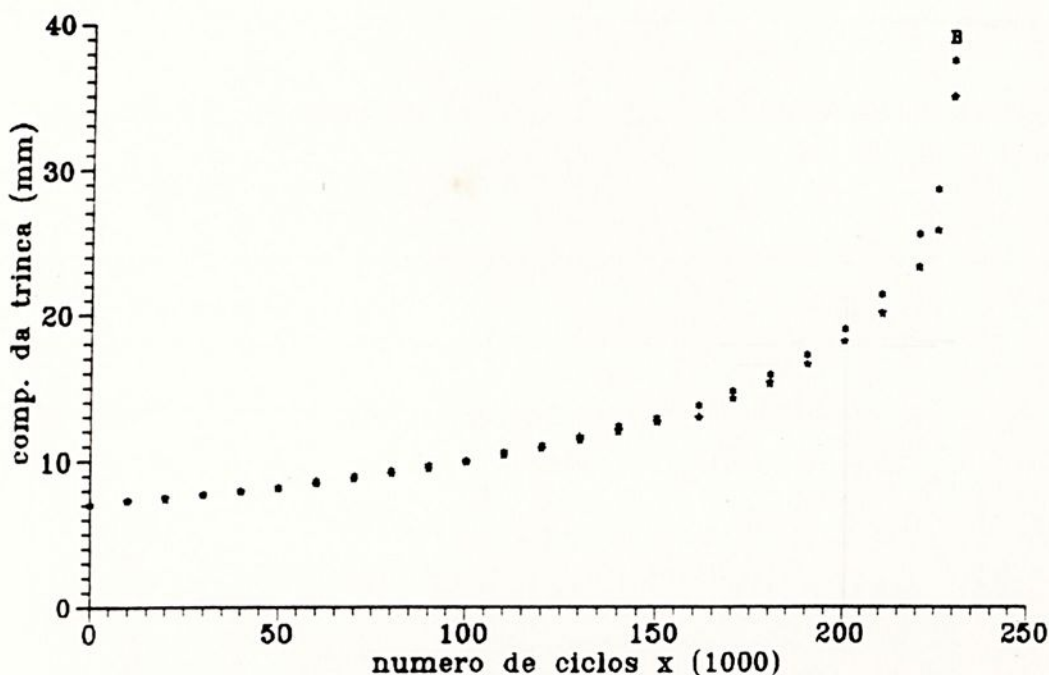


Figura(5.8)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(51,5 \pm 3,5)$  kN e freq. = 180 Hz





Figura(5.9)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(15,0 \pm 5,0)$  kN e freq.= 90 Hz



Figura(5.10)- Ensaio de amplitude constante-  
carga= $(15,0 \pm 5,0)$  kN e freq.= 180 Hz

### 5.2.1- 1º Programa de Estudo: Tipo de equações

#### cinéticas de Paris

Tabela(5.2)-Valores de  $C_m$  e  $n_m$  - Frequência de 90Hz.

Os dados obtidos nos ensaios foram usados para correlacionar a taxa de crescimento da trinca  $\left(\frac{da}{dN}\right)$ , com o parâmetro  $\Delta K$  dos ensaios de fadiga, durante o estágio II de crescimento da trinca, através dos parâmetros  $C$  e  $n$  propostos na equação de Paris e Erdogan [39]. Para o cálculo destes parâmetros foi utilizado o software "RPCA 3.01"[62], que segue as recomendações da norma ASTM-E647.

|    |    |               |      |              |      |
|----|----|---------------|------|--------------|------|
| 48 |    | $1,83E^{-10}$ | 1,62 | $-1,4E^{-1}$ | 0,87 |
| 20 | 10 | $1,34E^{-10}$ | 1,62 | $-6,9E^{-1}$ | 0,50 |

Tabela(5.3)-Valores de  $C_m$  e  $n_m$  - frequência de 180 Hz.

| Carregamento (kN) |      | $C_m$         | $n_m$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$ |
|-------------------|------|---------------|-------|--------------|-------------------------------------------|
| max.              | min. |               |       |              |                                           |
| 10                | 3    | $6,42E^{-10}$ | 1,56  | $-1,4E^{-1}$ | 0,30                                      |
| 14                | 7    | $8,23E^{-10}$ | 1,70  | $-1,7E^{-1}$ | 0,30                                      |
| 41                | 34   | $1,60E^{-9}$  | 1,80  | $-4,6E^{-1}$ | 0,83                                      |
| 55                | 48   | $2,44E^{-9}$  | 1,80  | $-8,0E^{-1}$ | 0,87                                      |
| 20                | 10   | $1,80E^{-10}$ | 1,62  | $-7,7E^{-1}$ | 0,50                                      |

Nas tabelas (5.2) e (5.3) estão listados os valores de  $C_{ind.}$  e  $n_{ind.}$  para os diversos ensaios.

Tabela(5.2)- Valores de  $C_{ind.}$  e  $n_{ind.}$  - frequência de 90Hz.

| Carregamento (kN) |      | $C_{ind.}$    | $n_{ind.}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|-------------------|------|---------------|------------|--------------|-------------------------------------------|
| max.              | min. |               |            |              |                                           |
| 10                | 3    | $3,00E^{-10}$ | 1,92       | $-2,1E^{-2}$ | 0,30                                      |
| 14                | 7    | $3,12E^{-10}$ | 2,14       | $-7,7E^{-3}$ | 0,50                                      |
| 41                | 34   | $1,20E^{-9}$  | 1,90       | $-8,8E^{-3}$ | 0,83                                      |
| 55                | 48   | $2,83E^{-9}$  | 1,63       | $-1,4E^{-3}$ | 0,87                                      |
|                   |      |               |            |              |                                           |
| 20                | 10   | $1,84E^{-9}$  | 1,62       | $6,9E^{-3}$  | 0,50                                      |

Tabela(5.3)- Valores de  $C_{ind.}$  e  $n_{ind.}$  - frequência de 180 Hz.

| Carregamento (kN) |      | $C_{ind.}$    | $n_{ind.}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|-------------------|------|---------------|------------|--------------|-------------------------------------------|
| max.              | min. |               |            |              |                                           |
| 10                | 3    | $6,42E^{-10}$ | 1,56       | $-1,4E^{-2}$ | 0,30                                      |
| 14                | 7    | $8,23E^{-10}$ | 1,70       | $1,7E^{-3}$  | 0,50                                      |
| 41                | 34   | $1,60E^{-9}$  | 1,80       | $-4,6E^{-3}$ | 0,83                                      |
| 55                | 48   | $2,44E^{-9}$  | 1,80       | $8,0E^{-3}$  | 0,87                                      |
|                   |      |               |            |              |                                           |
| 20                | 10   | $1,80E^{-9}$  | 1,62       | $-7,7E^{-3}$ | 0,50                                      |





O modelo proposto por Paris [39] considera os termos  $C$  e  $n$  como duas constantes do material. Foi possível verificar que, na realidade, os valores variam em função das condições de carregamento.

Embora os valores não sejam constantes, é possível observar que, para as diversas razões de carregamento, os valores de  $C$  e  $n$  situaram-se entre  $2,83 E^{-9}$  e  $3,00 E^{-10}$  para  $C$  e entre 2,14 e 1,56 para  $n$ , o que representa uma diferença de  $2,53 E^{-9}$  entre os valores máximo e mínimo encontrados para  $C$  e uma diferença de 0,58 para os valores de  $n$ .

Com a finalidade de reduzir o número de variáveis e de minimizar a dispersão foram determinadas as constantes  $C$  e  $n$  genéricas, que considera um valor médio para  $n$  ( $n_{\text{médio}}$ ), obtendo-se um valor de  $C$  ( $C_{\text{gen}}$ ) para cada ensaio, mantendo-se constante o valor de  $n$ .

A determinação das constantes genéricas  $C_{\text{gen}}$  e  $n_{\text{médio}}$  foram obtidas para três condições distintas:

- 1) Mantendo-se a amplitude dos carregamentos constante e variando-se a frequência da aplicação da carga.
- 2) Mantendo-se a frequência e a amplitude constantes, variando-se os níveis de carregamento.
- 3) Mantendo-se a frequência constante e variando-se a amplitude e os níveis de carregamento.

Os valores de  $C_{\text{gen}}$  e  $n_{\text{médio}}$  para estas novas situações podem ser observados nas tabelas (5.4), (5.5), (5.6), (5.7), (5.8) e (5.9), além dos desvios encontrados para cada ensaio individualmente em função dos novos parâmetros.



Tabela(5.4)-Valores de  $C_{gen}$  e  $n_{médio}$  para: carregamento constante e frequência do carregamento variável.

| Carregamento(kN) |      | Frequência<br>(Hz) | $C_{genérico}$ | $n_{médio}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|------------------|------|--------------------|----------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
| máx.             | mín. |                    |                |             |              |                                           |
| 10               | 3    | 90                 | $4,14E^{-10}$  | 1,74        | $-3,6E^{-2}$ | 0,30                                      |
|                  |      | 180                | $4,63E^{-10}$  |             | $-4,6E^{-3}$ |                                           |
| 14               | 7    | 90                 | $4,60E^{-10}$  | 1,92        | $-2,1E^{-2}$ | 0,50                                      |
|                  |      | 180                | $5,21E^{-10}$  |             | $4,5E^{-2}$  |                                           |
| 41               | 34   | 90                 | $1,32E^{-9}$   | 1,85        | $-1,7E^{-2}$ | 0,83                                      |
|                  |      | 180                | $1,46E^{-9}$   |             | $-2,5E^{-3}$ |                                           |
| 55               | 48   | 90                 | $2,40E^{-9}$   | 1,72        | $-4,0E^{-4}$ | 0,87                                      |
|                  |      | 180                | $2,83E^{-9}$   |             | $8,0E^{-3}$  |                                           |
| 20               | 10   | 90                 | $1,83E^{-9}$   | 1,62        | $8,0E^{-3}$  | 0,50                                      |
|                  |      | 180                | $1,81E^{-9}$   |             | $-7,7E^{-3}$ |                                           |

Tabela(5.5)-Valores de  $C_{gen}$  e  $n_{médio}$  para: carregamento variável, amplitude e frequência(90Hz) constantes.

| Carregamento(kN) |      | $C_{genérico}$ | $n_{médio}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|------------------|------|----------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
| max.             | min. |                |             |              |                                           |
| 10               | 3    | $3,10E^{-10}$  | 1,90        | $-2,2E^{-2}$ | 0,30                                      |
| 14               | 7    | $4,79E^{-10}$  |             | $-2,2E^{-2}$ | 0,50                                      |
| 41               | 34   | $1,20E^{-9}$   |             | $-8,8E^{-4}$ | 0,83                                      |
| 55               | 48   | $1,69E^{-9}$   |             | $3,8E^{-3}$  | 0,87                                      |
|                  |      |                |             |              |                                           |
| 20               | 10   | $1,84E^{-9}$   | 1,62        | $6,9E^{-3}$  | 0,50                                      |





Tabela(5.6)-Valores de  $C_{gen}$  e  $n_{médio}$  para: carregamento variável, amplitude e frequência (180Hz) constantes.

| Carregamento(kN) |      | $C_{genérico}$ | $n_{médio}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|------------------|------|----------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
| max.             | min. |                |             |              |                                           |
| 10               | 3    | $4,82E^{-10}$  | 1,72        | $-6,7E^{-3}$ | 0,30                                      |
| 14               | 7    | $7,96E^{-10}$  |             | $4,8E^{-3}$  | 0,50                                      |
| 41               | 34   | $1,87E^{-9}$   |             | $-7,7E^{-3}$ | 0,83                                      |
| 55               | 48   | $2,83E^{-9}$   |             | $8,0E^{-3}$  | 0,87                                      |
|                  |      |                |             |              |                                           |
| 20               | 10   | $1,80E^{-9}$   | 1,62        | $-7,7E^{-3}$ | 0,50                                      |

Tabela(5.7)-Valores de  $C_{gen}$  e  $n_{médio}$  para: carregamento variável e frequência (90 Hz) constante.

| Carregamento (kN) |      | $C_{genérico}$ | $n_{médio}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|-------------------|------|----------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
| max.              | min. |                |             |              |                                           |
| 10                | 3    | $3,43E^{-10}$  | 1,84        | $-2,8E^{-2}$ | 0,30                                      |
| 14                | 7    | $5,28E^{-10}$  |             | $-2,5E^{-2}$ | 0,50                                      |
| 41                | 34   | $1,34E^{-9}$   |             | $-1,8E^{-2}$ | 0,83                                      |
| 55                | 48   | $1,88E^{-9}$   |             | $2,7E^{-3}$  | 0,87                                      |
| 20                | 10   | $1,10E^{-9}$   |             | $4,1E^{-2}$  | 0,50                                      |





Tabela(5.8)-Valores de  $C_{gen}$  e  $n_{medio}$  para: carregamento variável e frequência (180 Hz) constante.

| Carregamento (kN) |      | $C_{genérico}$ | $n_{medio}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|-------------------|------|----------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
| max.              | min. |                |             |              |                                           |
| 10                | 3    | $4,99E^{-10}$  | 1,70        | $-7,7E^{-3}$ | 0,30                                      |
| 14                | 7    | $8,27E^{-10}$  |             | $1,7E^{-2}$  | 0,50                                      |
| 41                | 34   | $1,94E^{-9}$   |             | $-8,8E^{-3}$ | 0,83                                      |
| 55                | 48   | $2,93E^{-9}$   |             | $8,0E^{-3}$  | 0,87                                      |
| 20                | 10   | $1,53E^{-9}$   |             | $-5,6E^{-3}$ | 0,50                                      |

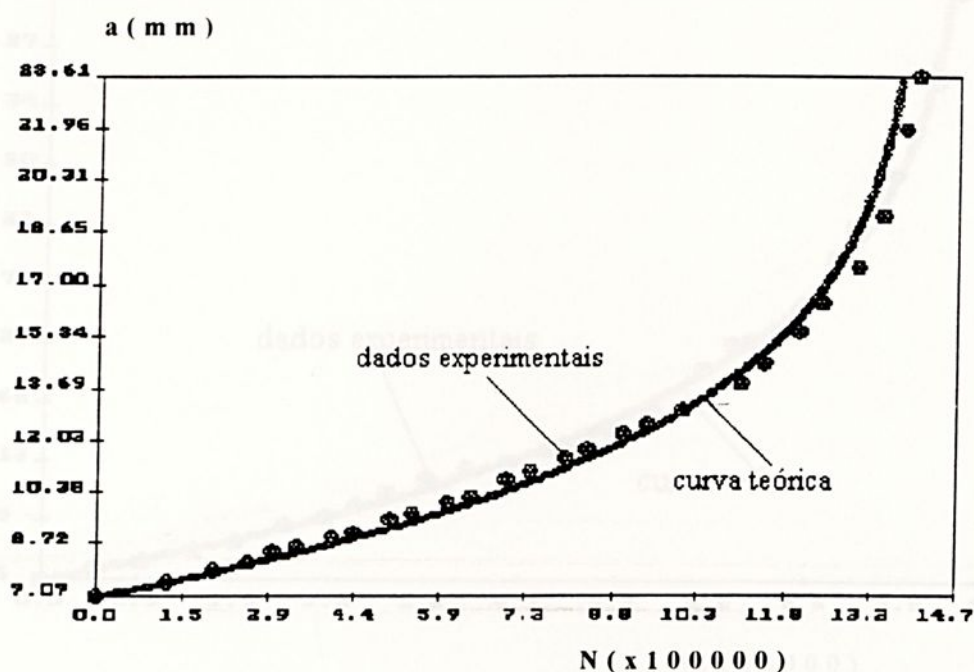
Tabela(5.9)-Valores de  $C_{gen}$  e  $n_{medio}$  para: carregamento e frequência variáveis.

| Carregamento (kN) |      | $C_{genérico}$ | $n_{medio}$ | Desvio       | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|-------------------|------|----------------|-------------|--------------|-------------------------------------------|
| máx               | mín. |                |             |              |                                           |
| 10                | 3    | $3,91E^{-10}$  | 1,77        | $-3,4E^{-2}$ | 0,30                                      |
|                   |      | $4,37E^{-10}$  |             | $-2,5E^{-3}$ |                                           |
| 14                | 7    | $6,00E^{-10}$  |             | $-2,8E^{-2}$ | 0,50                                      |
|                   |      | $7,13E^{-10}$  |             | $1,4E^{-2}$  |                                           |
| 41                | 34   | $1,54E^{-9}$   |             | $-3,0E^{-2}$ | 0,83                                      |
|                   |      | $1,70E^{-9}$   |             | $-6,7E^{-3}$ |                                           |
| 55                | 48   | $2,17E^{-9}$   |             | $6,5E^{-4}$  | 0,87                                      |
|                   |      | $2,58E^{-9}$   |             | $8,0E^{-3}$  |                                           |
| 20                | 10   | $1,30E^{-9}$   |             | $2,9E^{-2}$  | 0,50                                      |
|                   |      | $1,31E^{-9}$   |             | $-2,5E^{-3}$ |                                           |

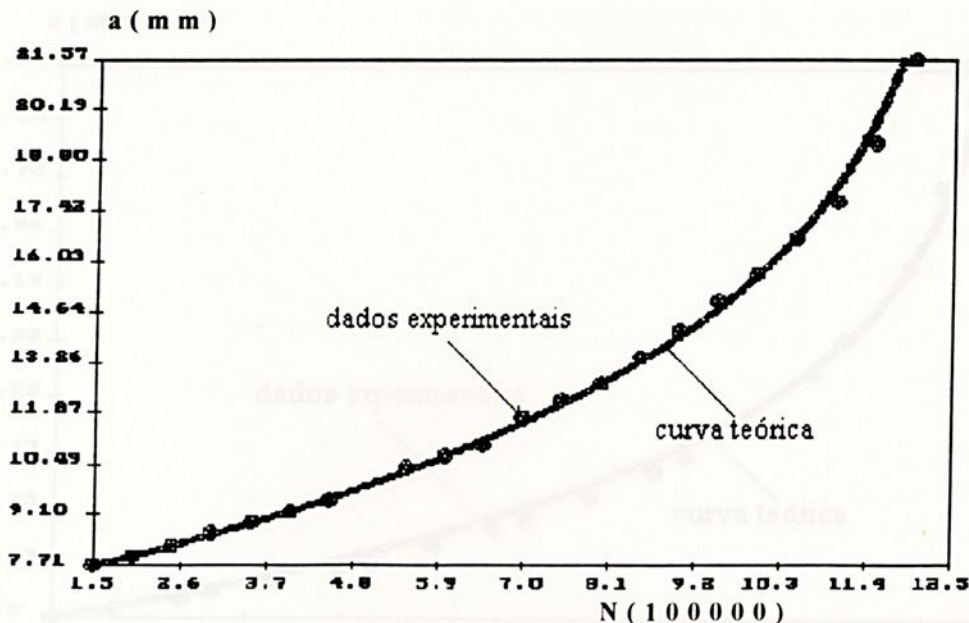
As curvas  $a$  versus  $N$  experimentais e as teóricas, obtidas pela equação de Paris, que consideram os valores



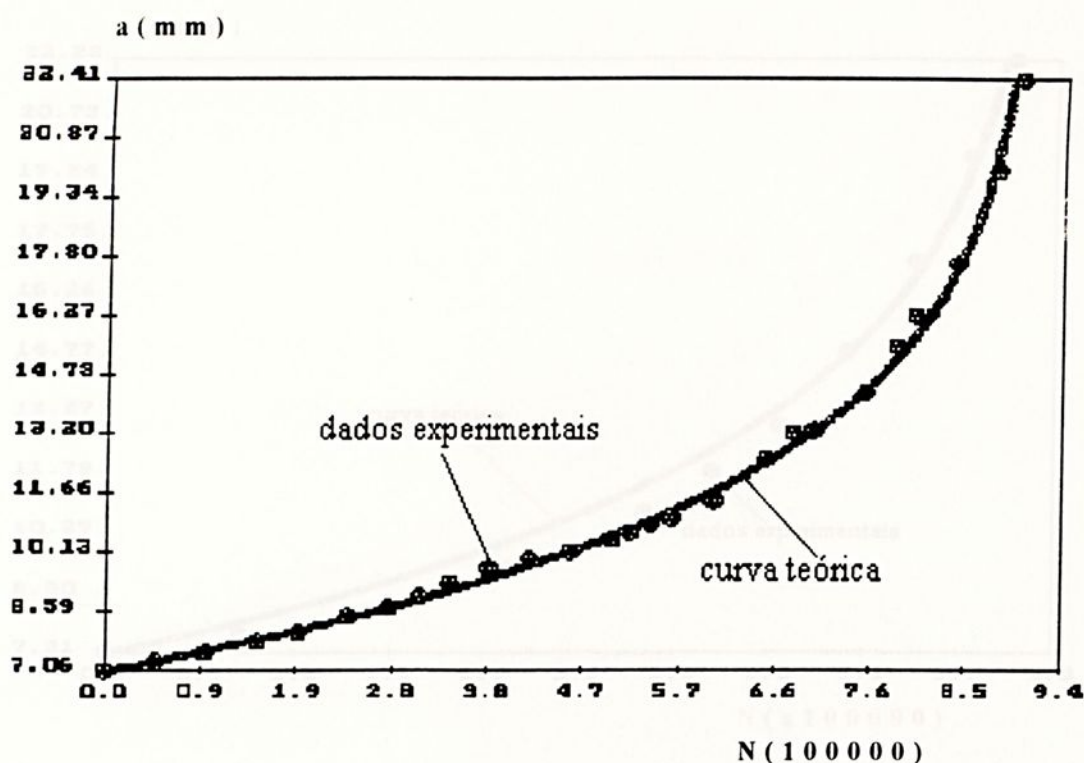
individuais de  $C$  e  $n$ , podem ser observadas nas figuras de (5.11) até (5.20).



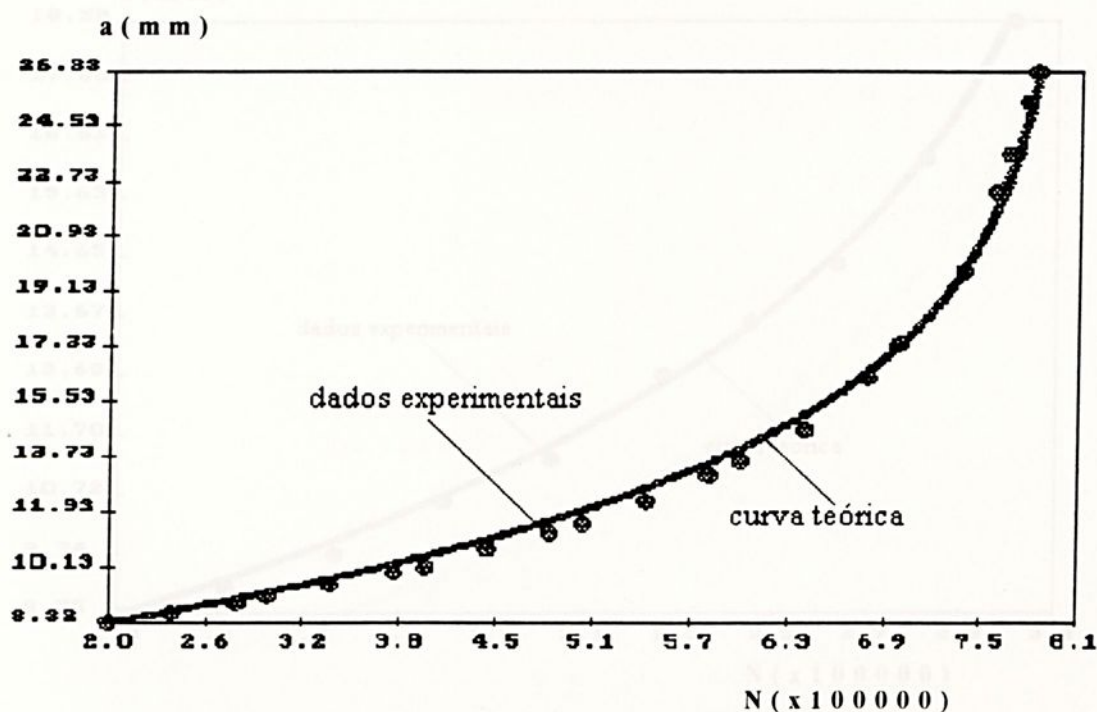
Figura(5.11)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)$  kN e  $f = 90$  Hz;  $C_{ind.} = 3,00 E^{-10}$  e  $n_{ind.} = 1,92$ .



Figura(5.12)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)$  kN e  $f = 180$  Hz;  $C_{ind.} = 6,42 E^{-10}$  e  $n_{ind.} = 1,56$ .

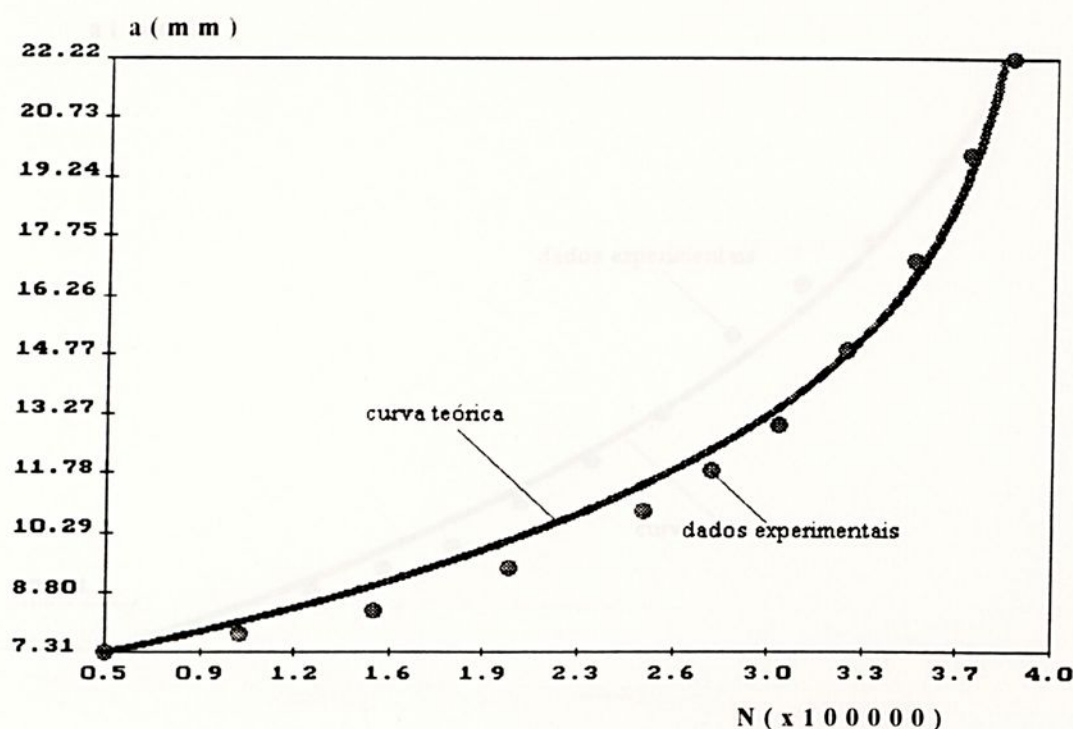


Figura(5.13)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=3,12 E^{-10}$  e  $n_{ind.}=2,14$ .

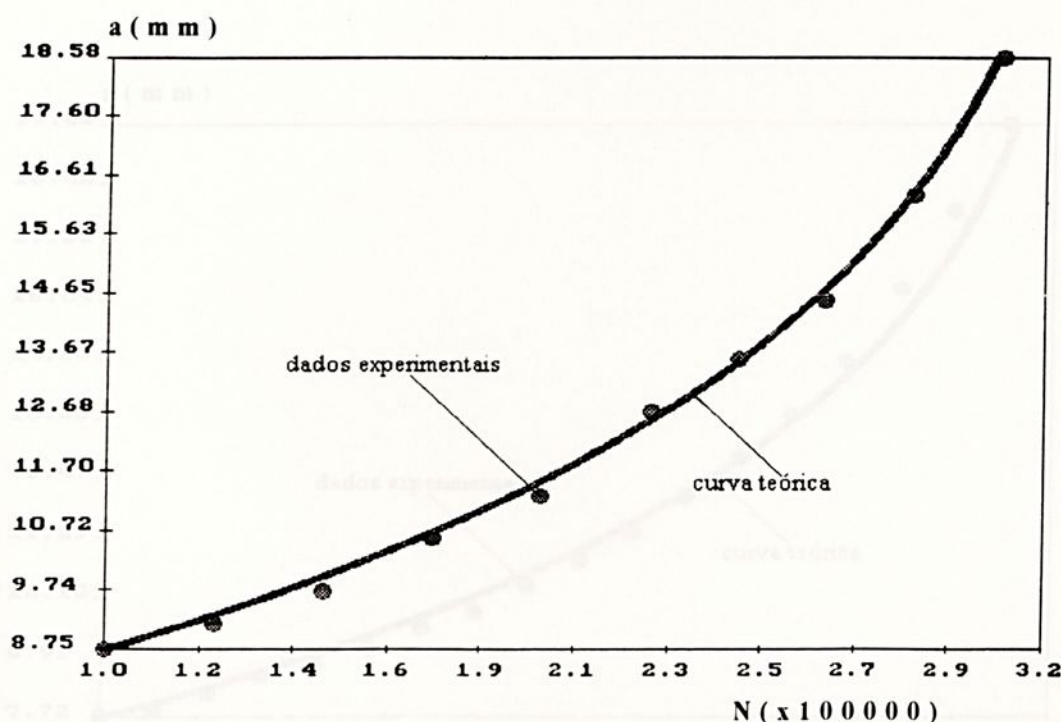


Figura(5.14)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=8,23 E^{-10}$  e  $n_{ind.}=1,70$ .

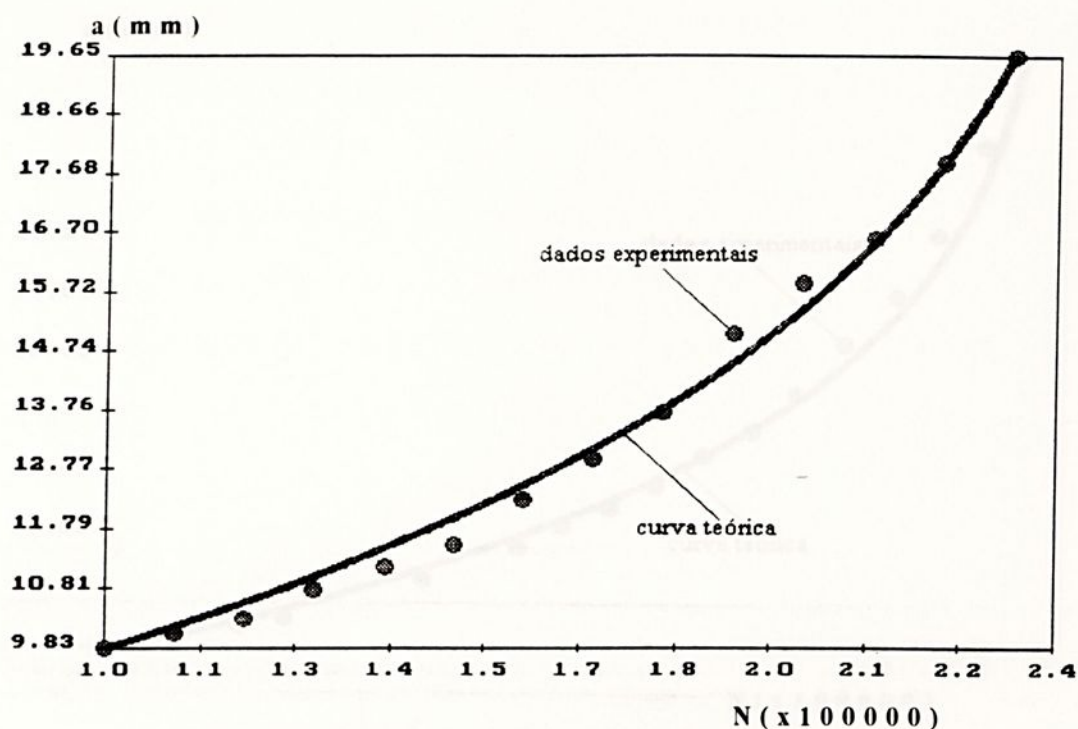




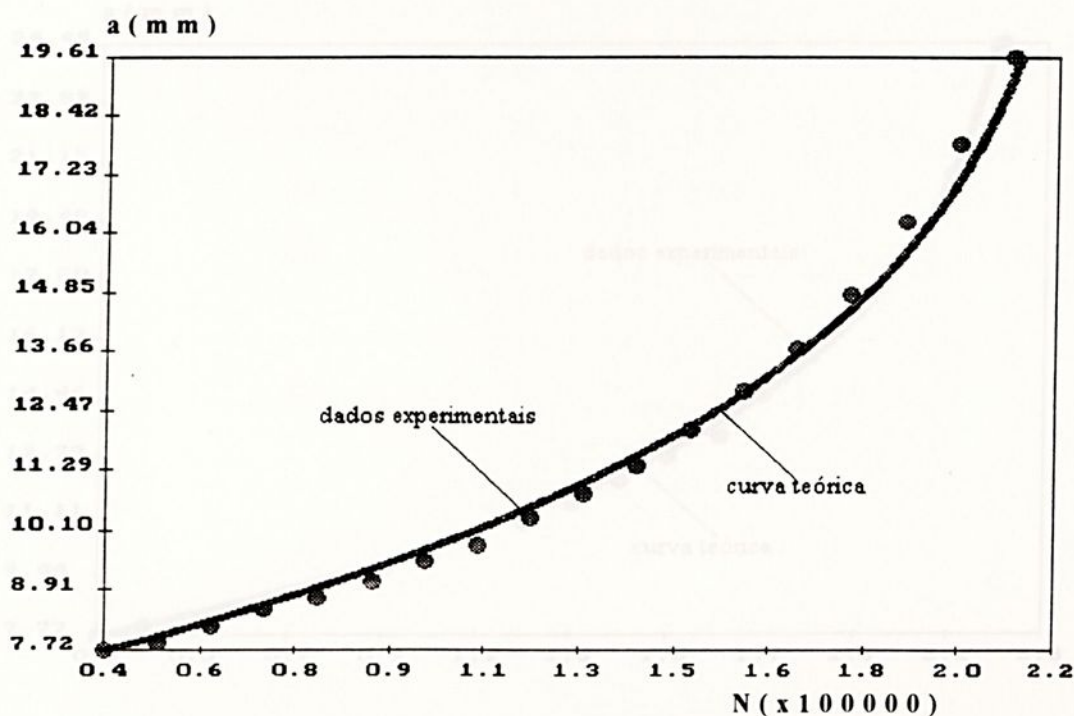
Figura(5.15)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=1,20 E^{-9}$  e  $n_{ind.}=1,90$ .



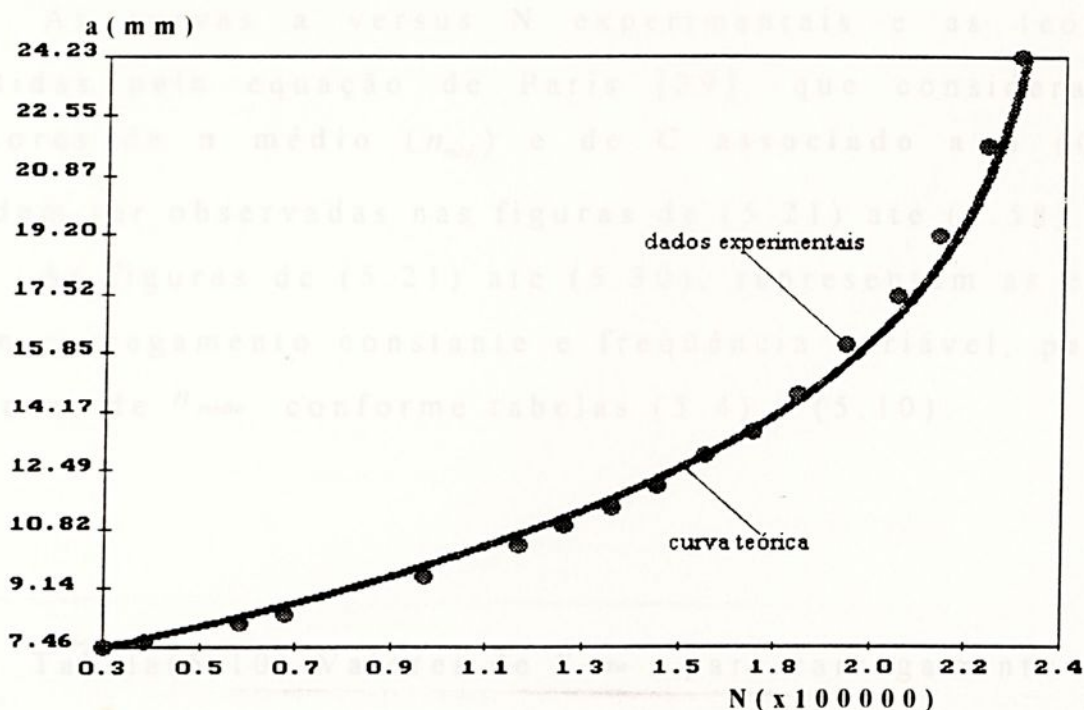
Figura(5.16)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=1,60 E^{-9}$  e  $n_{ind.}=1,80$ .



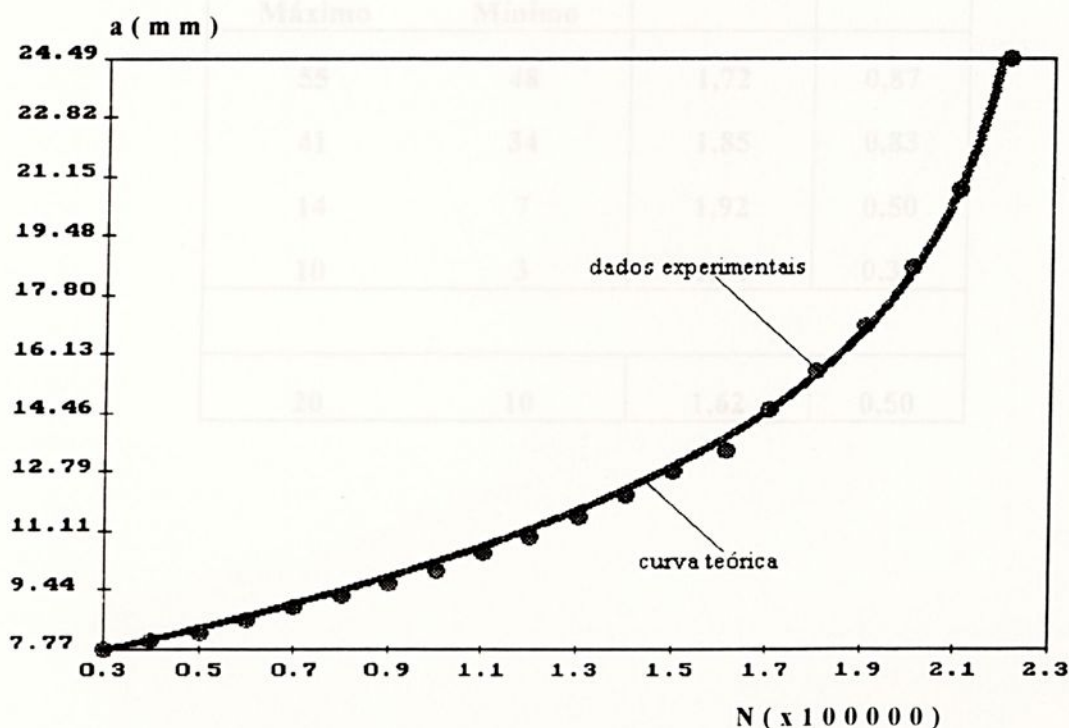
Figura(5.17)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=2,83 E^{-9}$  e  $n_{ind.}=1,63$ .



Figura(5.18)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=2,44 E^{-9}$  e  $n_{ind.}=1,80$ .



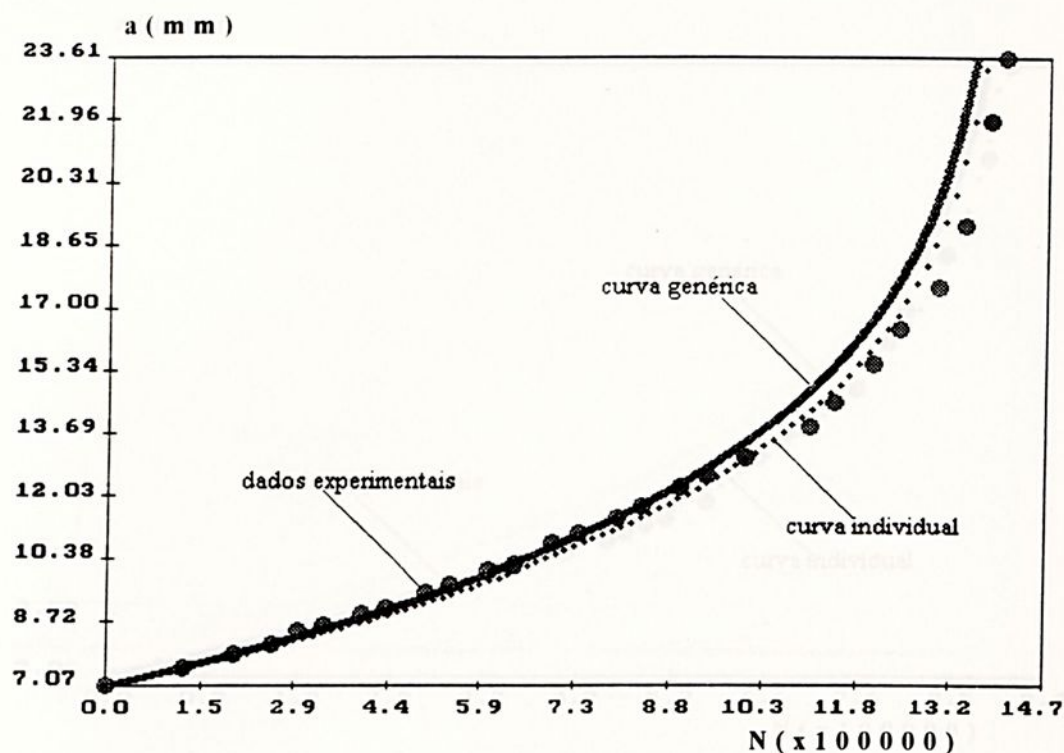
Figura(5.19)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=1,84 E^{-9}$  e  $n_{ind.}=1,62$ .



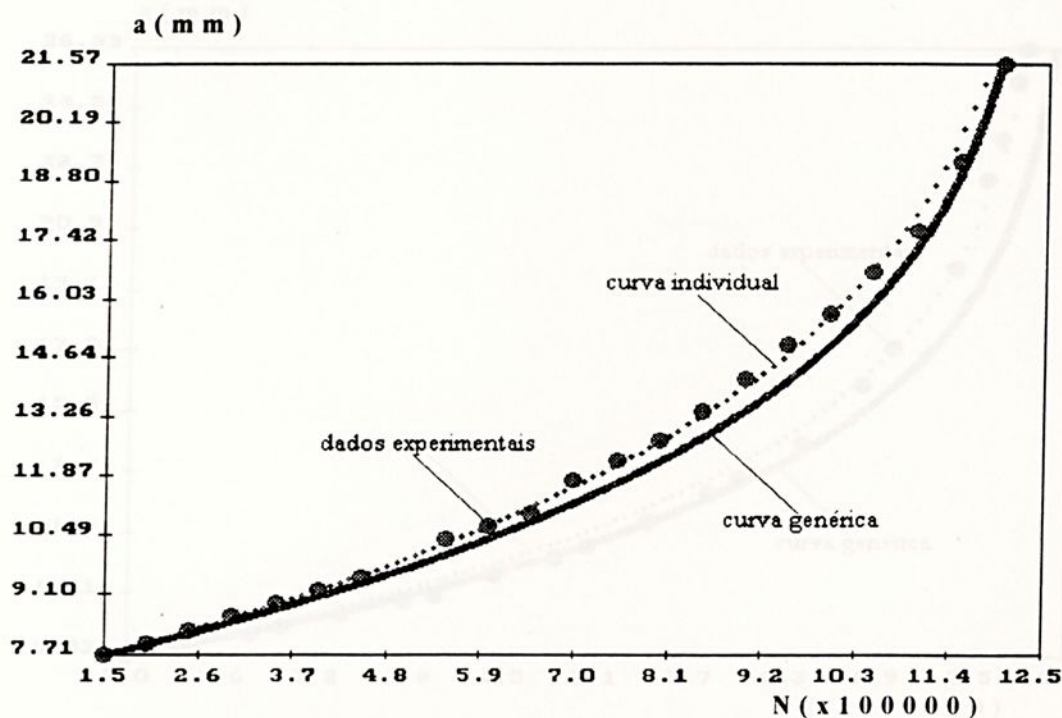
Figura(5.20)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{ind.}=1,84 E^{-9}$  e  $n_{ind.}=1,62$ .



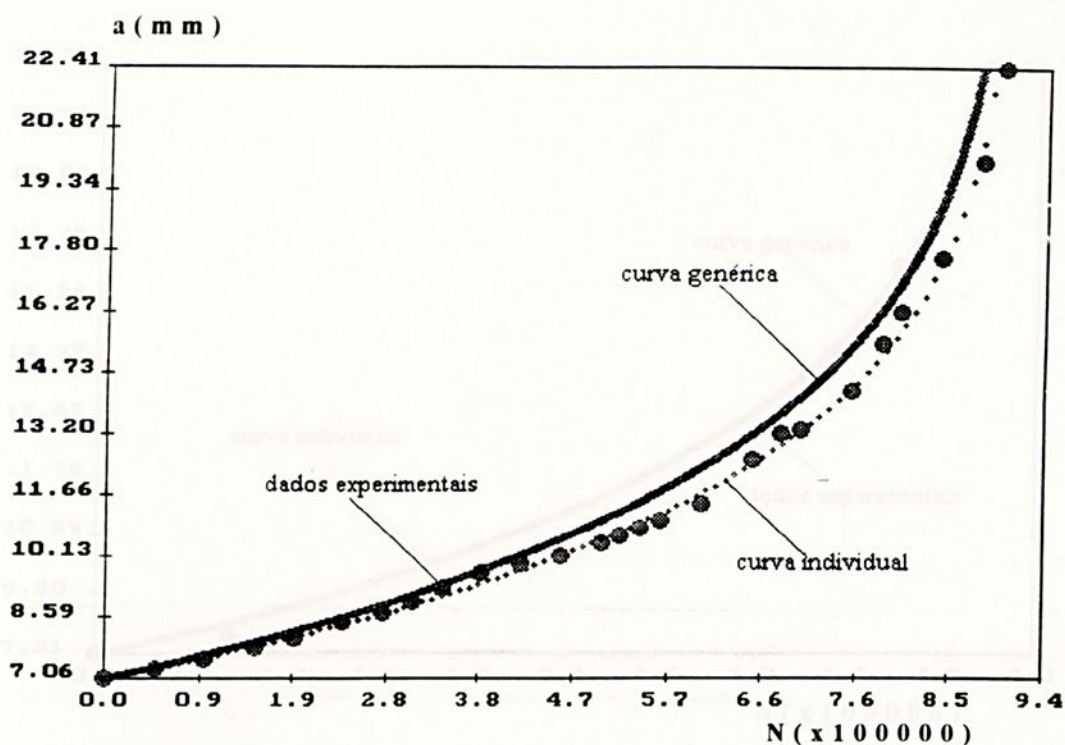




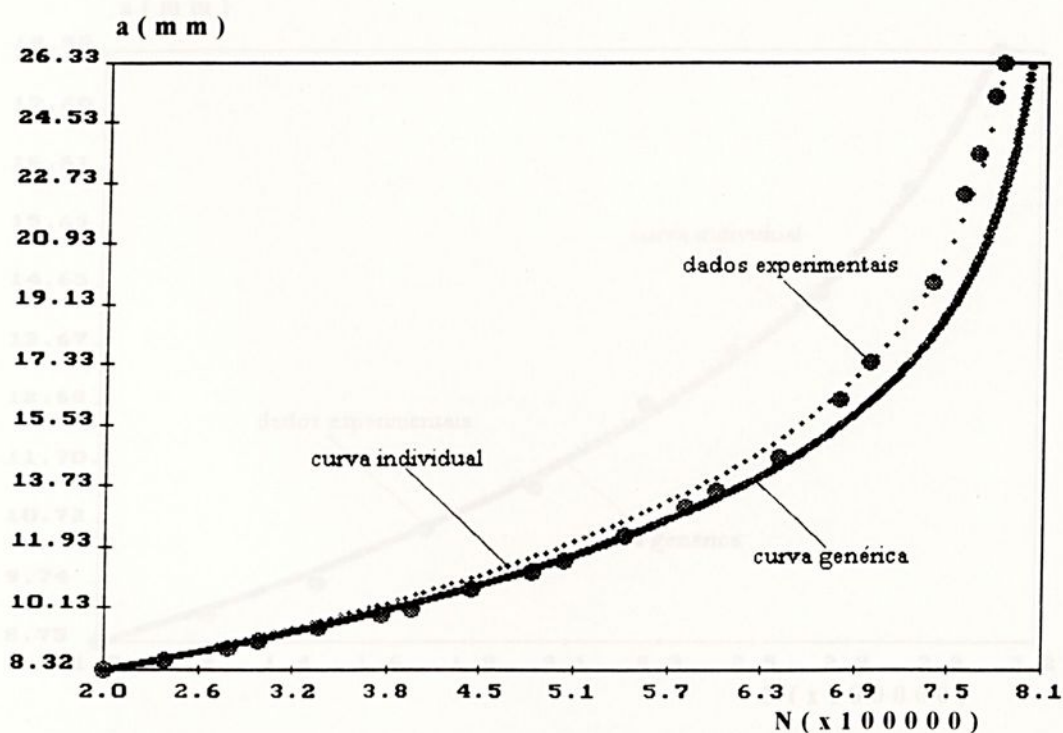
Figura(5.21)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{gen.}=4,14 E^{-10}$  e  $n_{med.}=1,74$ .



Figura(5.22)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{gen.}=4,63 E^{-10}$  e  $n_{med.}=1,74$ .

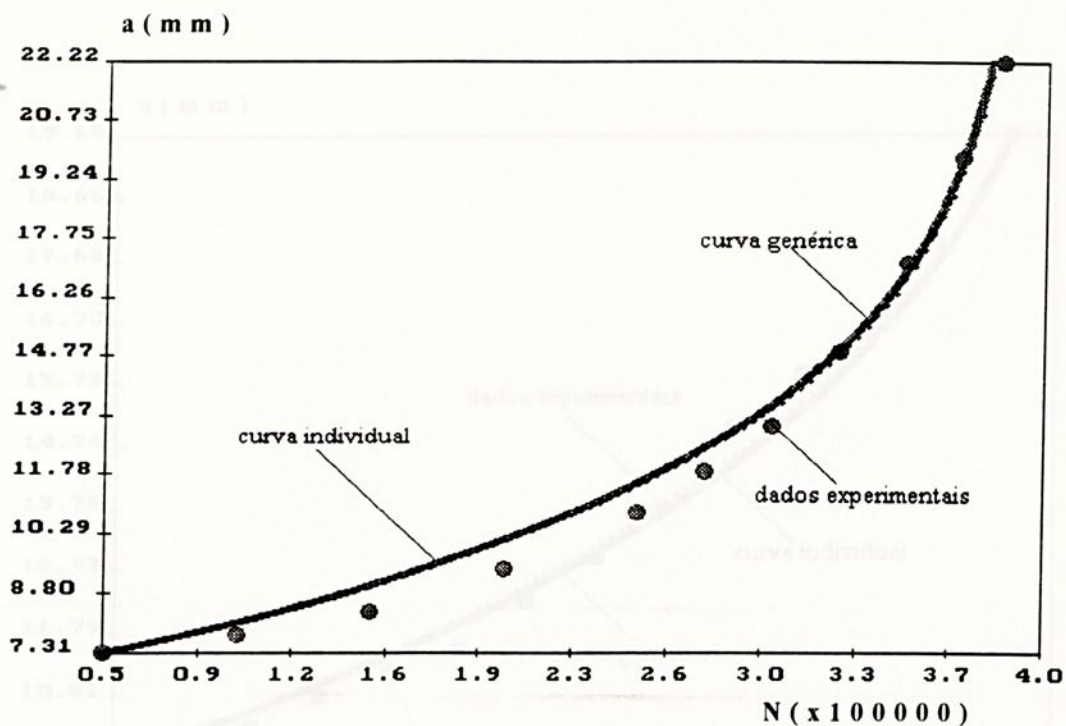


Figura(5.23)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=4,60 E^{-10}$  e  $n_{med}=1,92$ .

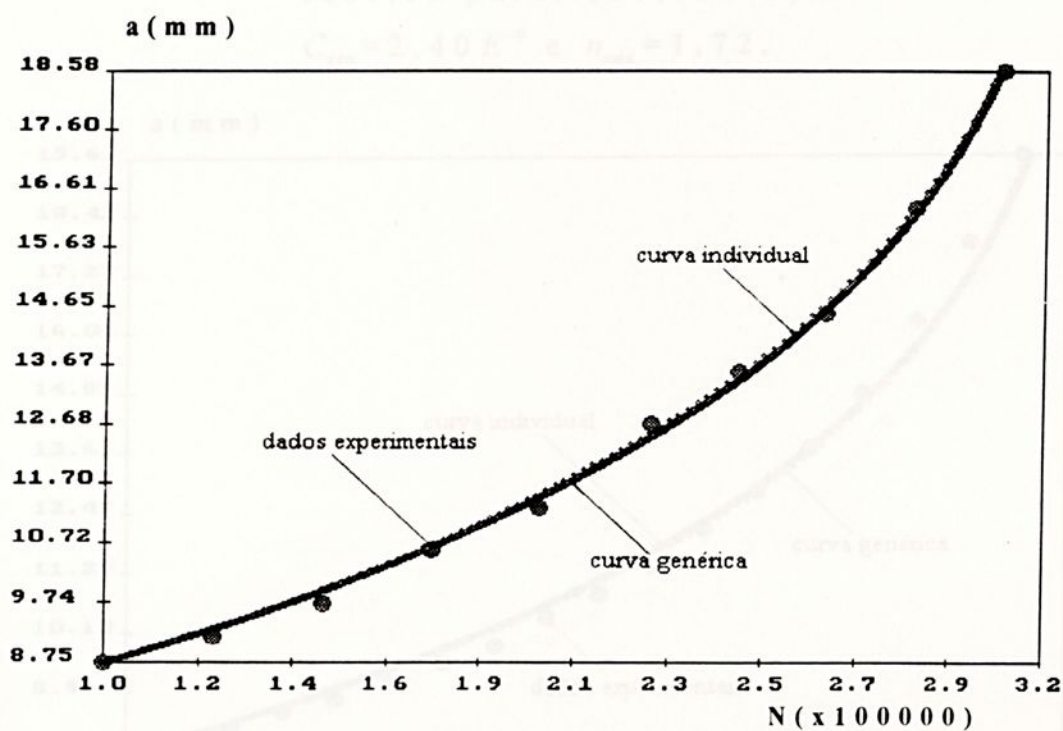


Figura(5.24)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=5,21 E^{-10}$  e  $n_{med}=1,92$ .

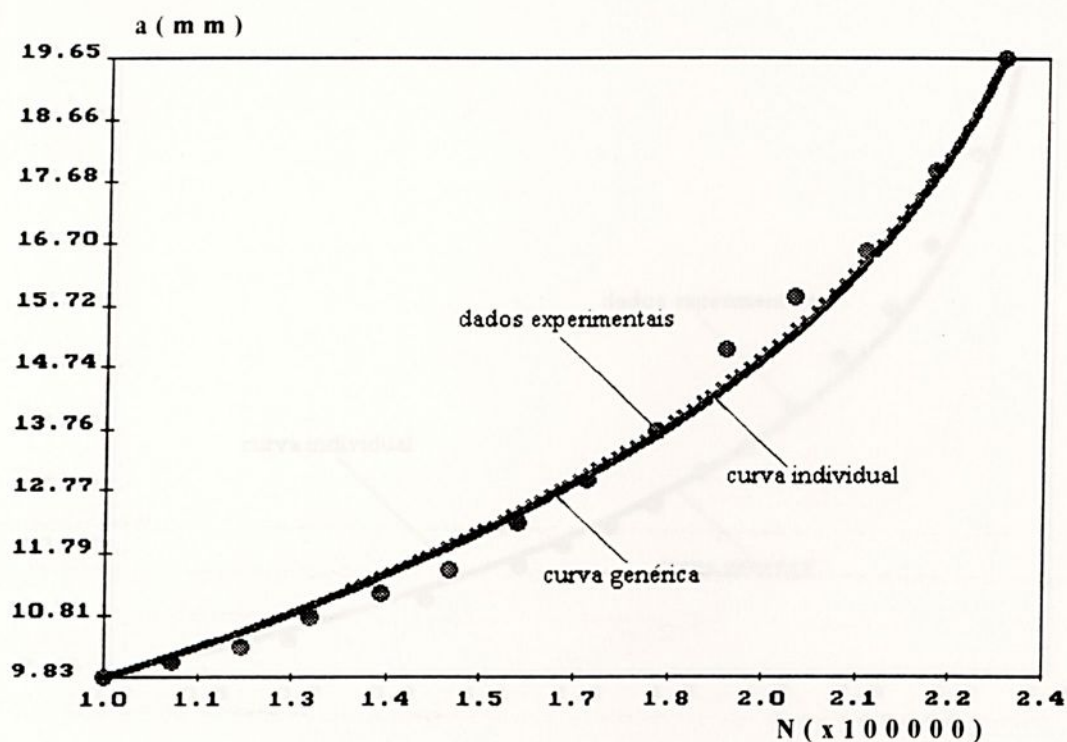




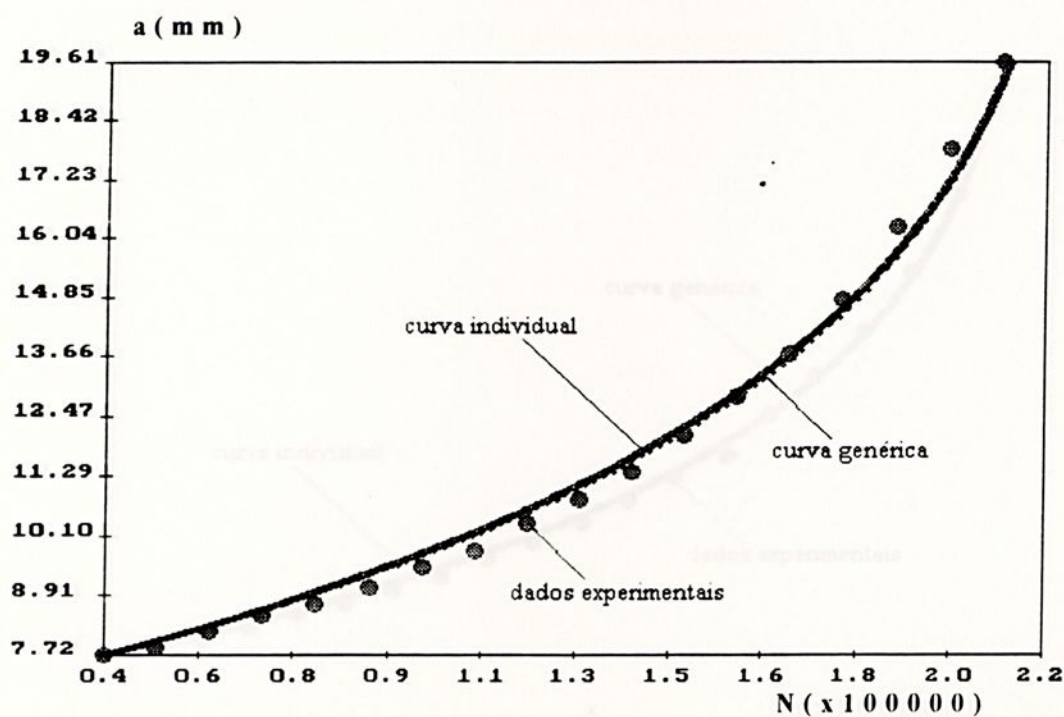
Figura(5.25)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=1,32 E^{-9}$  e  $n_{med.}=1,85$ .



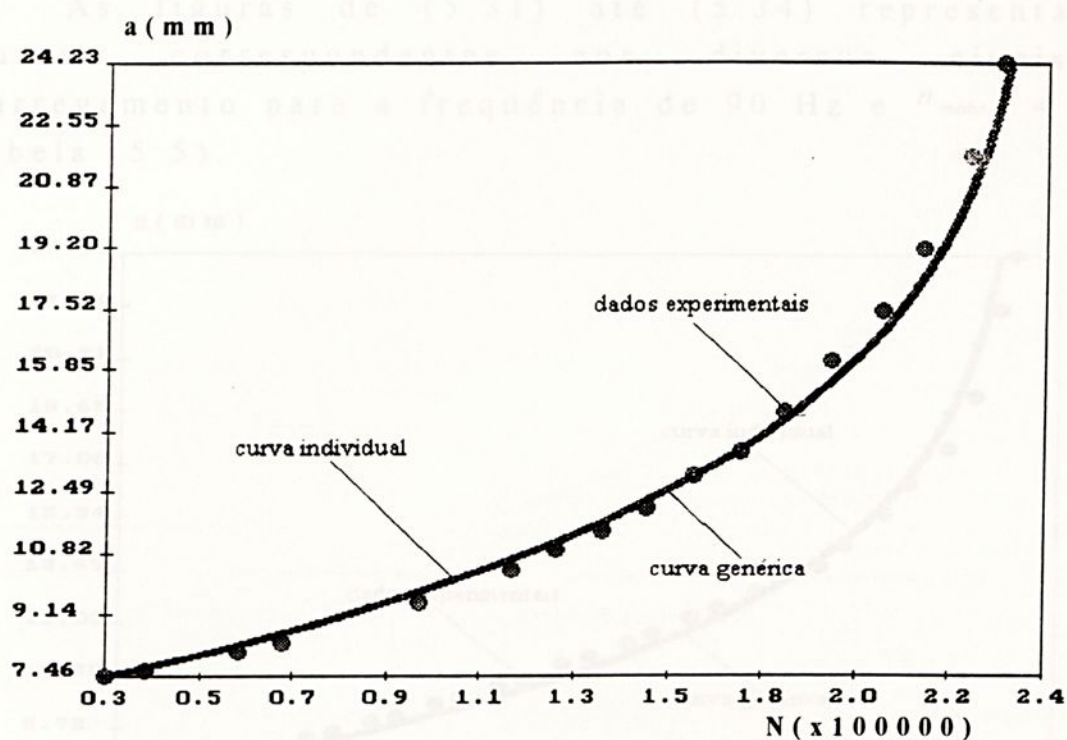
Figura(5.26)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=1,46 E^{-9}$  e  $n_{med.}=1,85$ .



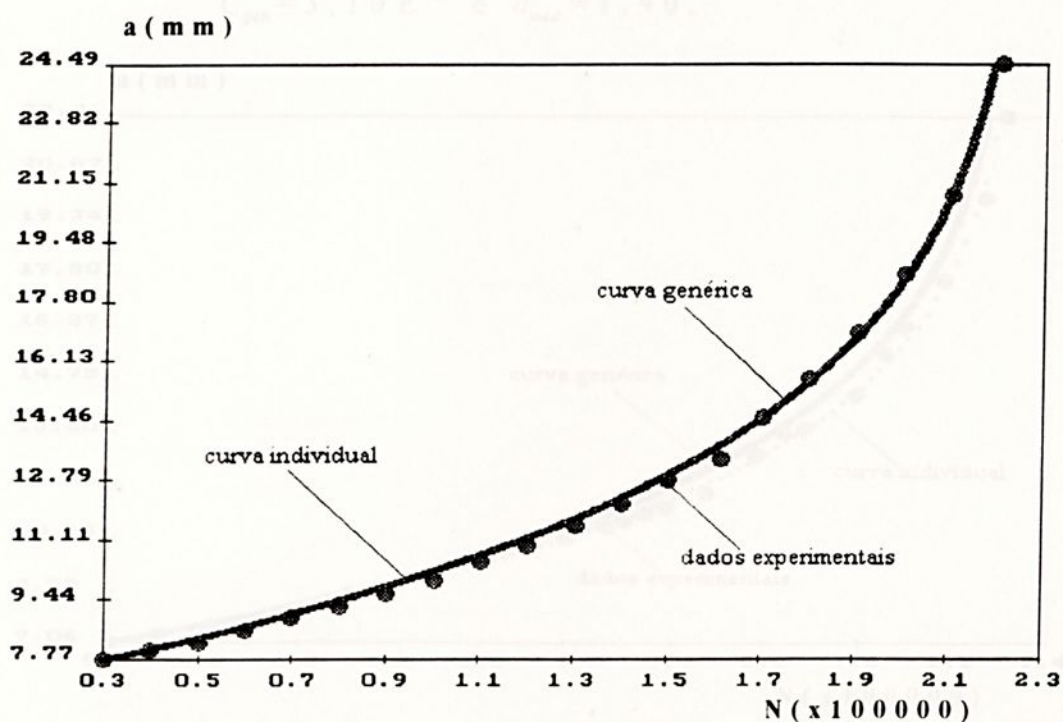
Figura(5.27)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=2,40 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,72$ .



Figura(5.28)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=2,83 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,72$ .



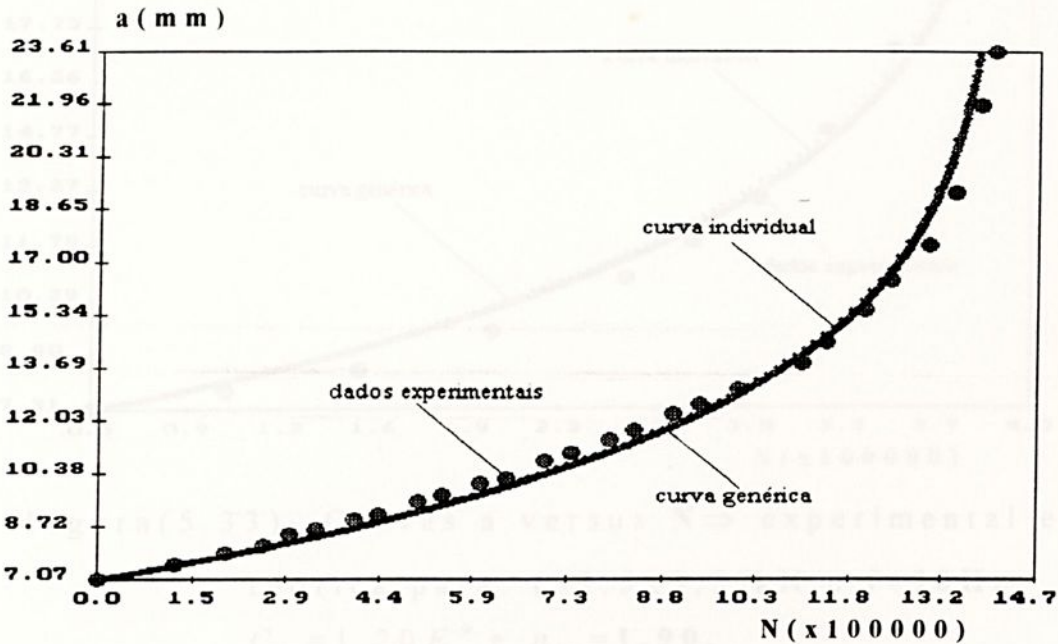
Figura(5.29)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0)\text{kN}$  e  $f=90\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=1,83 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,62$ .



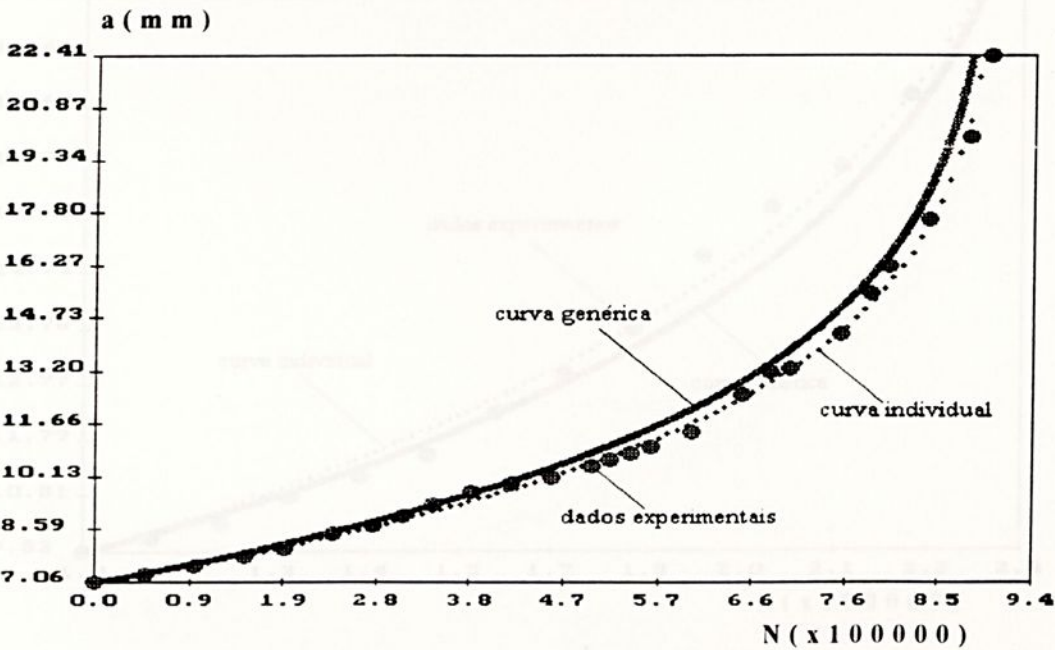
Figura(5.30)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0)\text{kN}$  e  $f=180\text{Hz}$ ;  $C_{gen}=1,81 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,62$ .



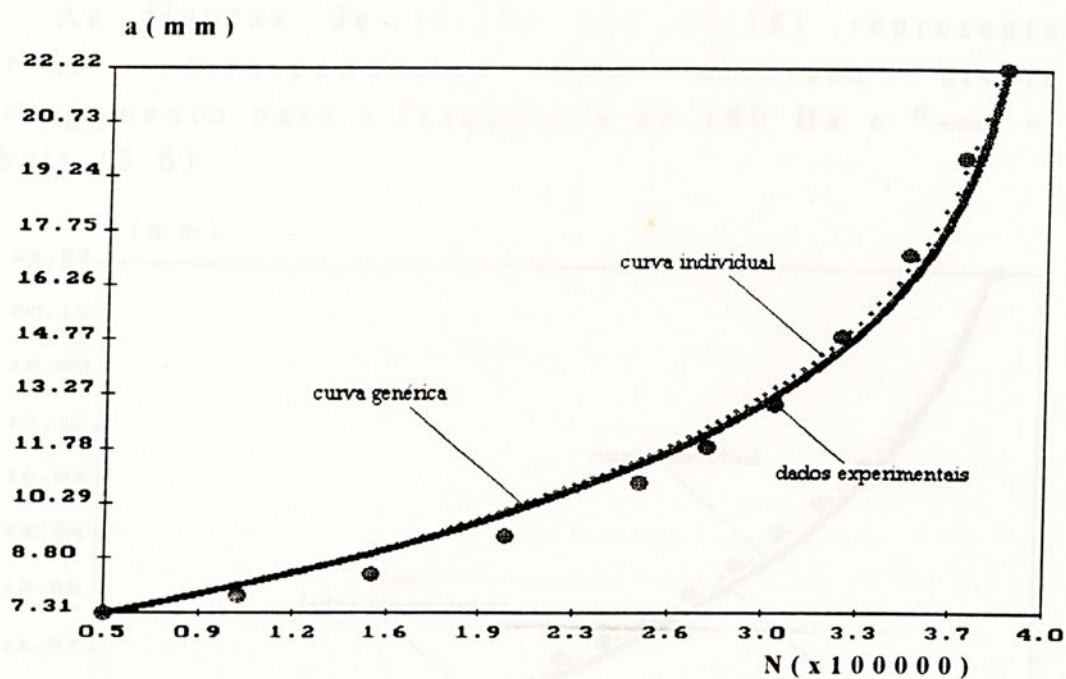
As figuras de (5.31) até (5.34) representam as curvas correspondentes aos diversos níveis de carregamento para a frequência de 90 Hz e  $n_{\text{medio}} = 1,90$ ; tabela (5.5).



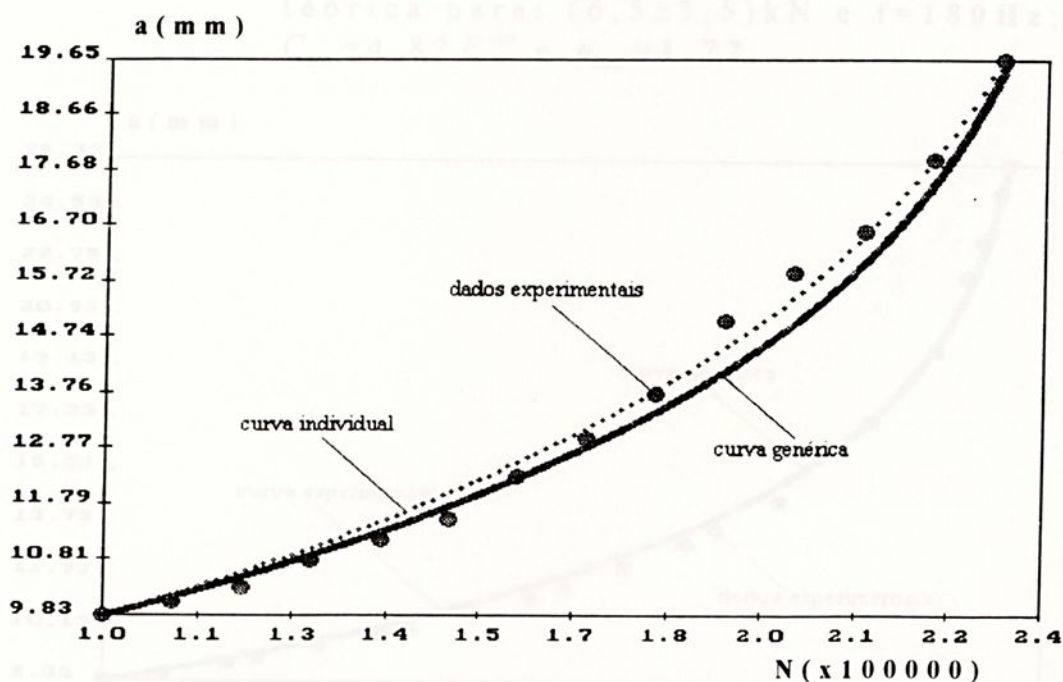
Figura(5.31)- Curvas a versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{\text{gen}}=3,10 E^{-10}$  e  $n_{\text{med}}=1,90$ .



Figura(5.32)- Curvas a versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{\text{gen}}=4,79 E^{-10}$  e  $n_{\text{med}}=1,90$ .

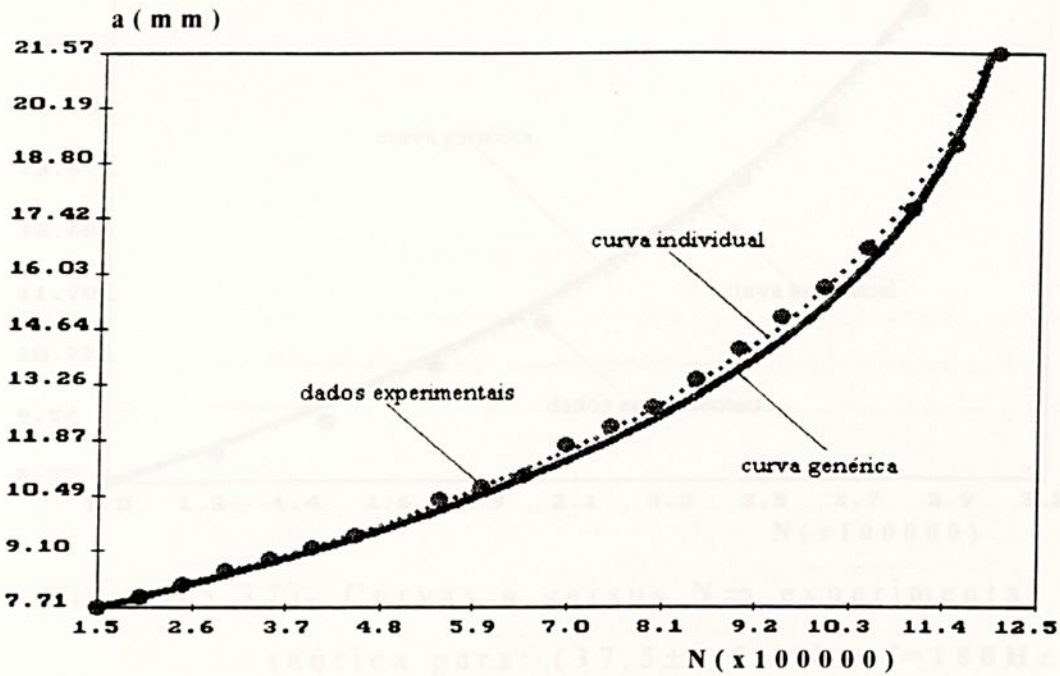


Figura(5.33)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,20 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,90$ .

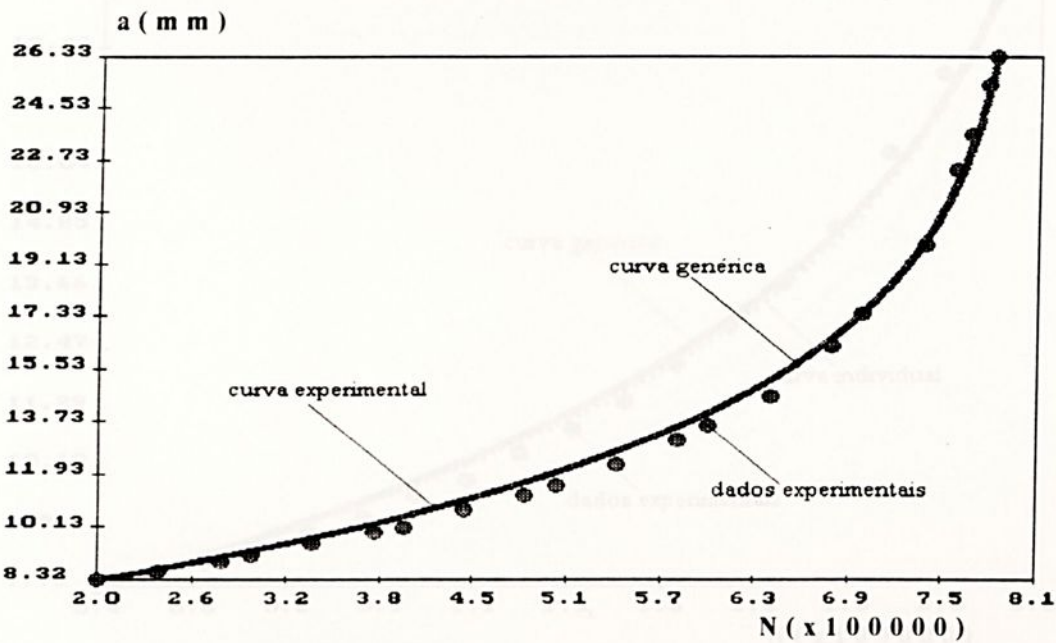


Figura(5.34)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,69 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,90$ .

As figuras de (5.35) até (5.38) representam as curvas correspondentes aos diversos níveis de carregamento para a frequência de 180 Hz e  $n_{\text{medio}} = 1,72$ ; tabela (5.6).

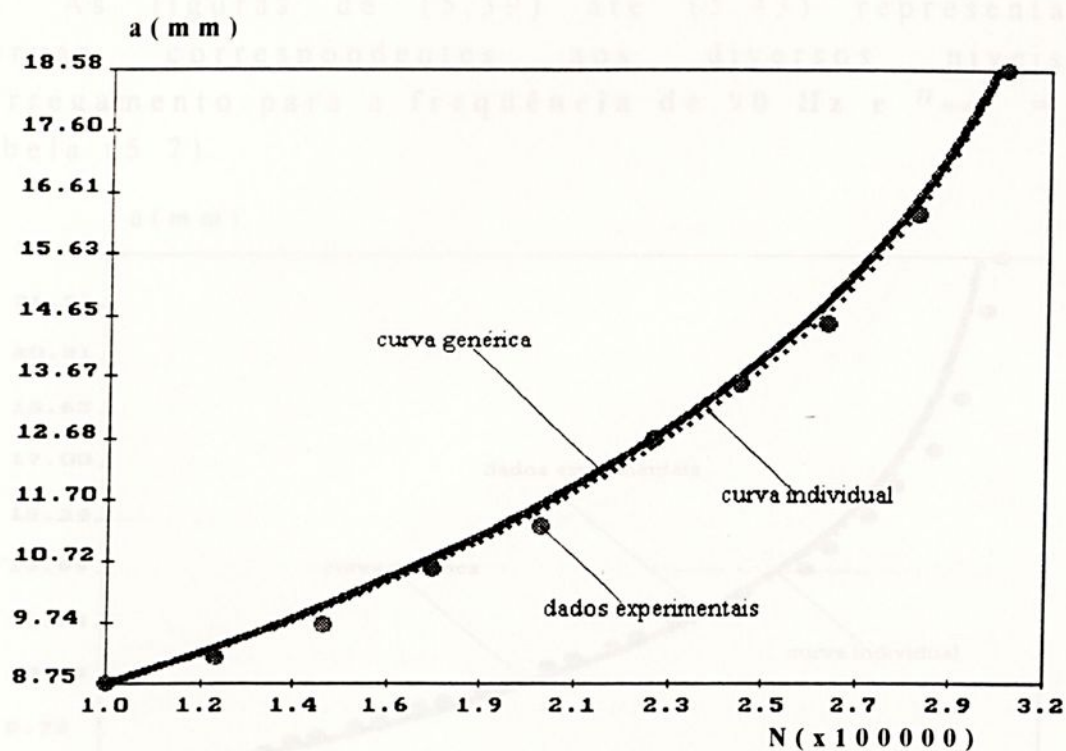


Figura(5.35)- Curvas a versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=180 \text{ Hz}$ ;  $C_{\text{gen}}=4,82 E^{-10}$  e  $n_{\text{med.}}=1,72$ .

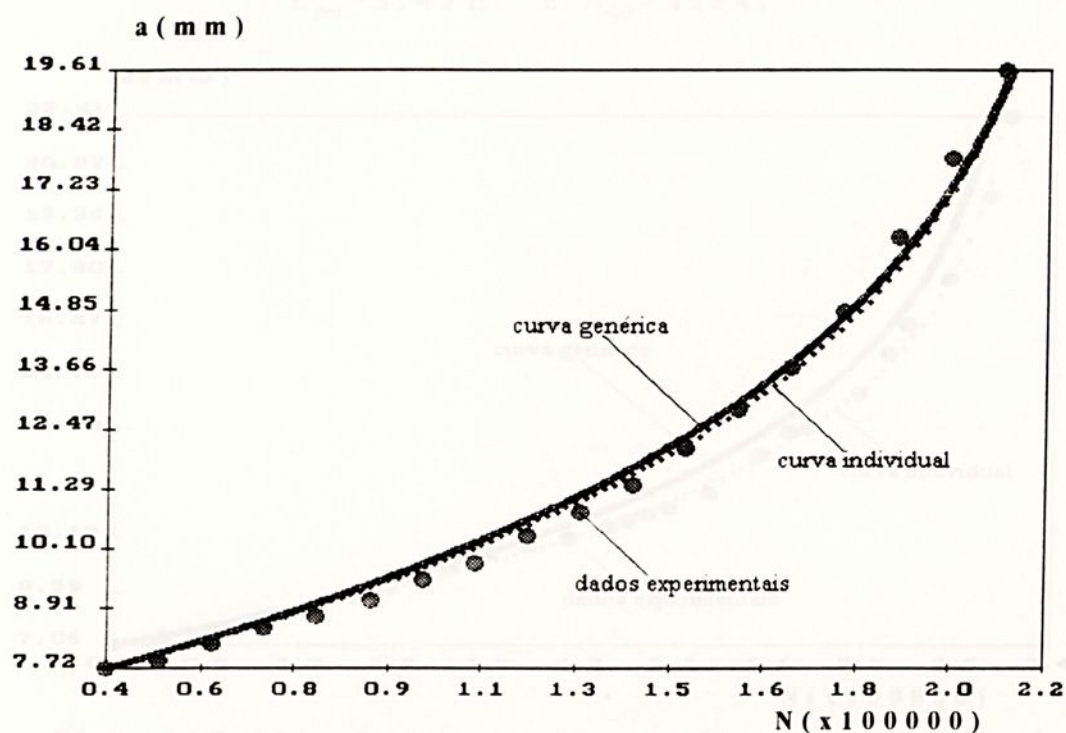


Figura(5.36)- Curvas a versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=180 \text{ Hz}$ ;  $C_{\text{gen}}=7,96 E^{-10}$  e  $n_{\text{med.}}=1,72$ .



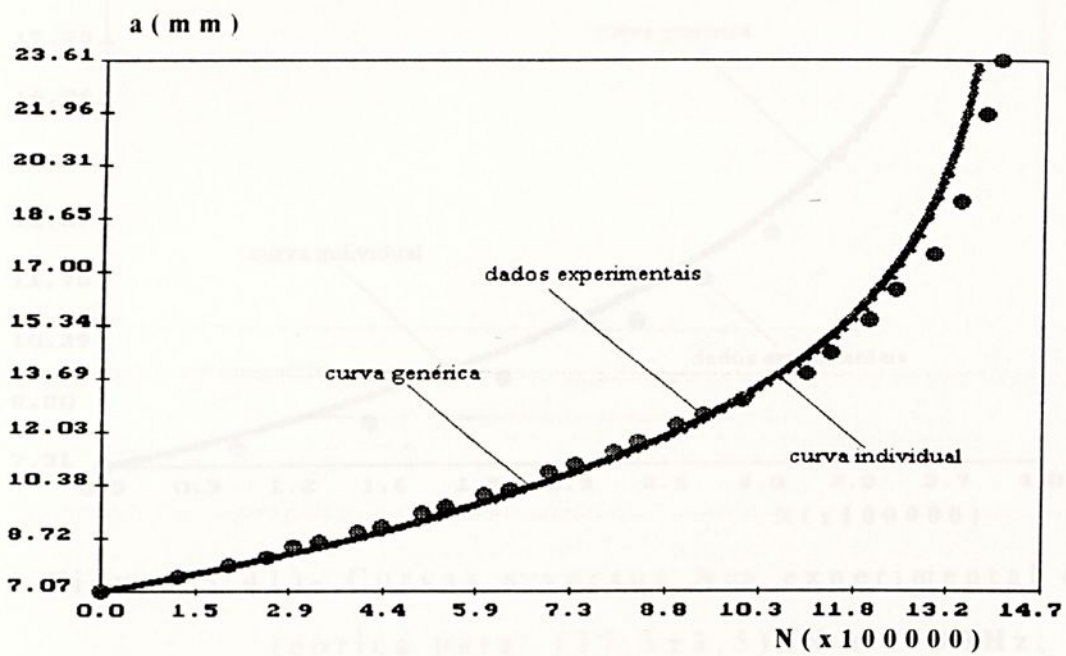


Figura(5.37)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen.}=1,87 E^{-9}$  e  $n_{med.}=1,72$ .

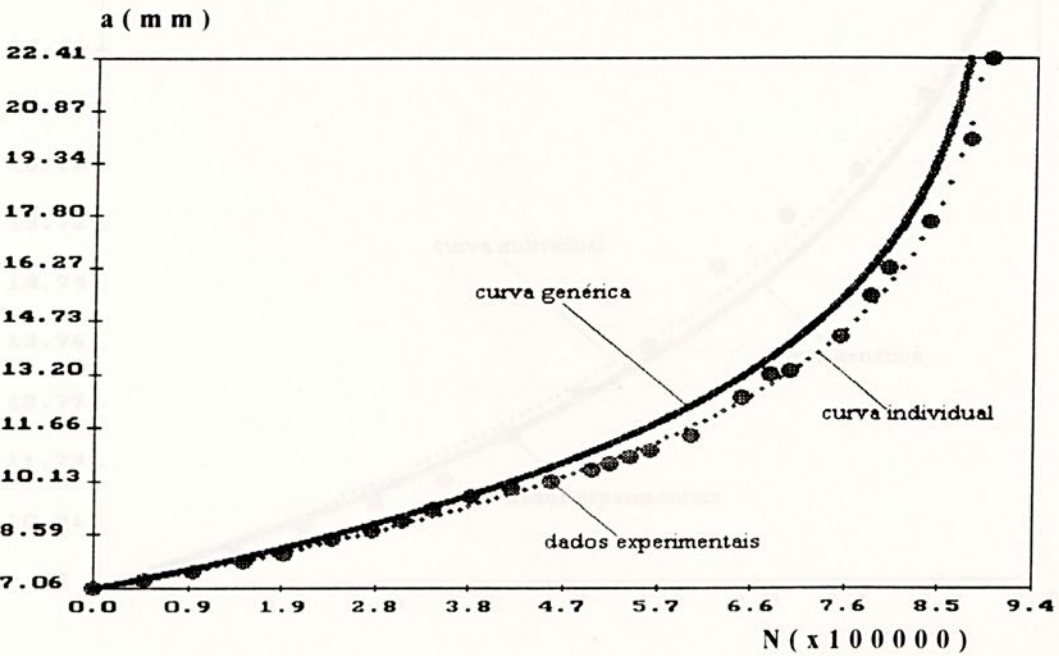


Figura(5.38)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen.}=2,83 E^{-9}$  e  $n_{med.}=1,72$ .

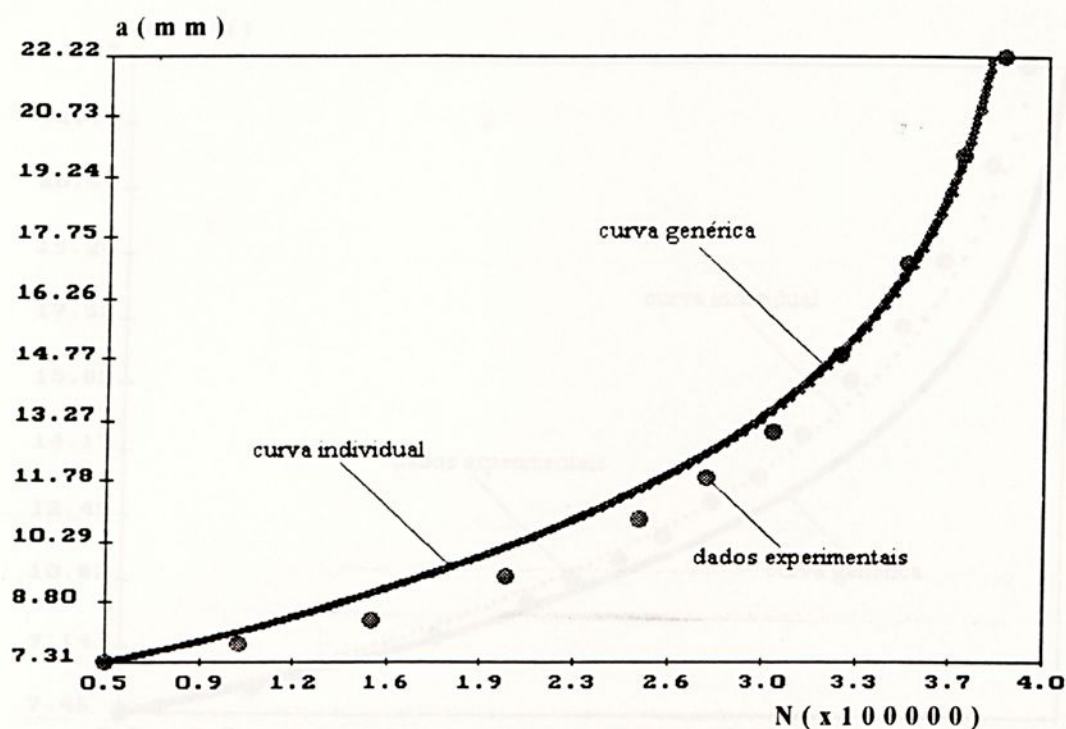
As figuras de (5.39) até (5.43) representam as curvas correspondentes aos diversos níveis de carregamento para a frequência de 90 Hz e  $n_{\text{médio}} = 1,84$ ; tabela (5.7).



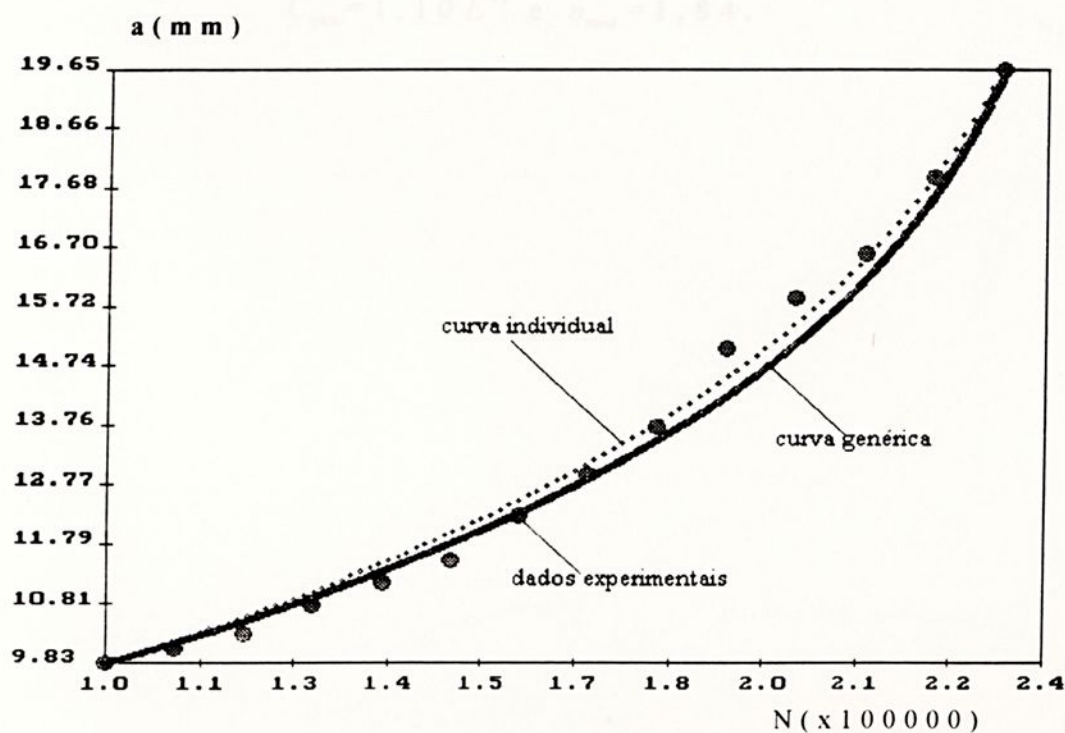
Figura(5.39)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=90$  Hz;  $C_{\text{gen}}=3,43 E^{-10}$  e  $n_{\text{med}}=1,84$ .



Figura(5.40)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=90$  Hz;  $C_{\text{gen}}=5,28 E^{-10}$  e  $n_{\text{med}}=1,84$ .



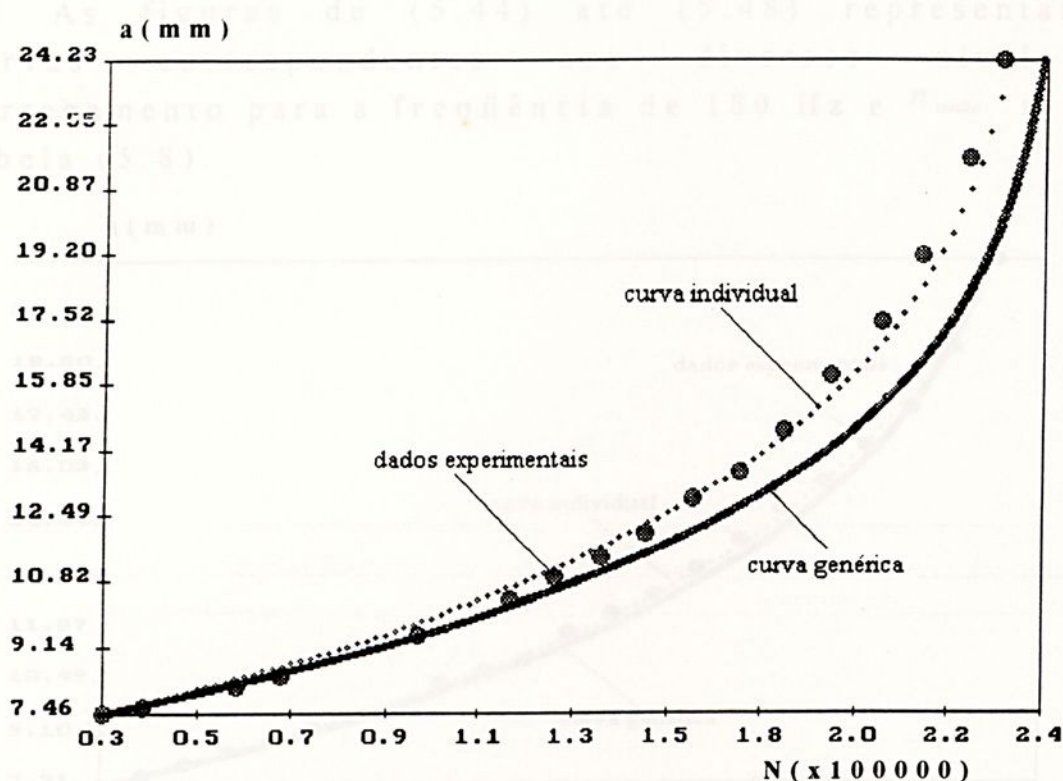
Figura(5.41)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,34 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,84$ .



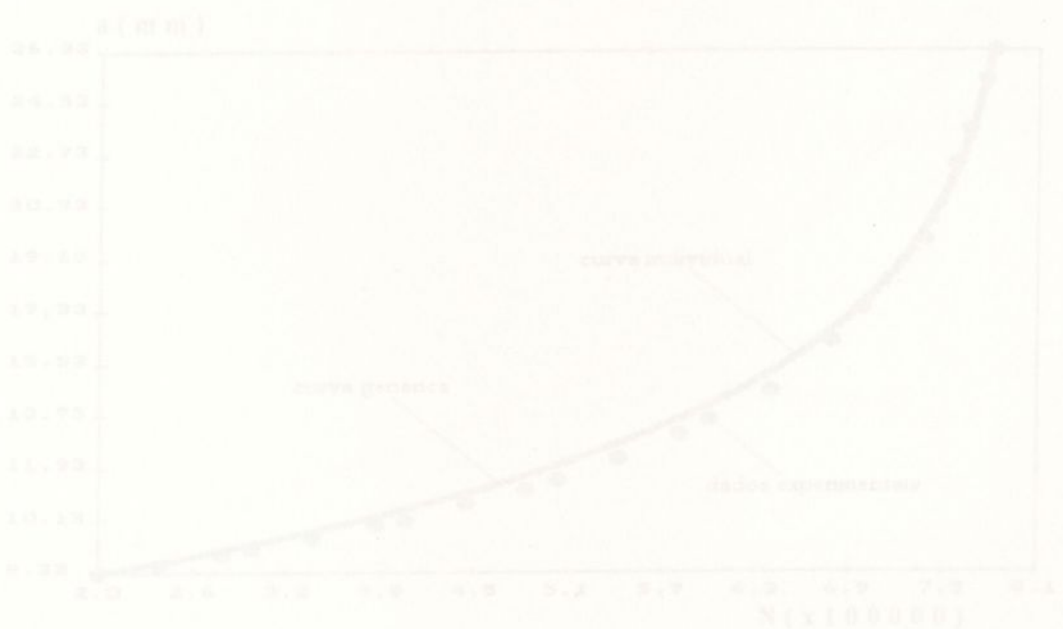
Figura(5.42)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,88 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,84$ .

800280



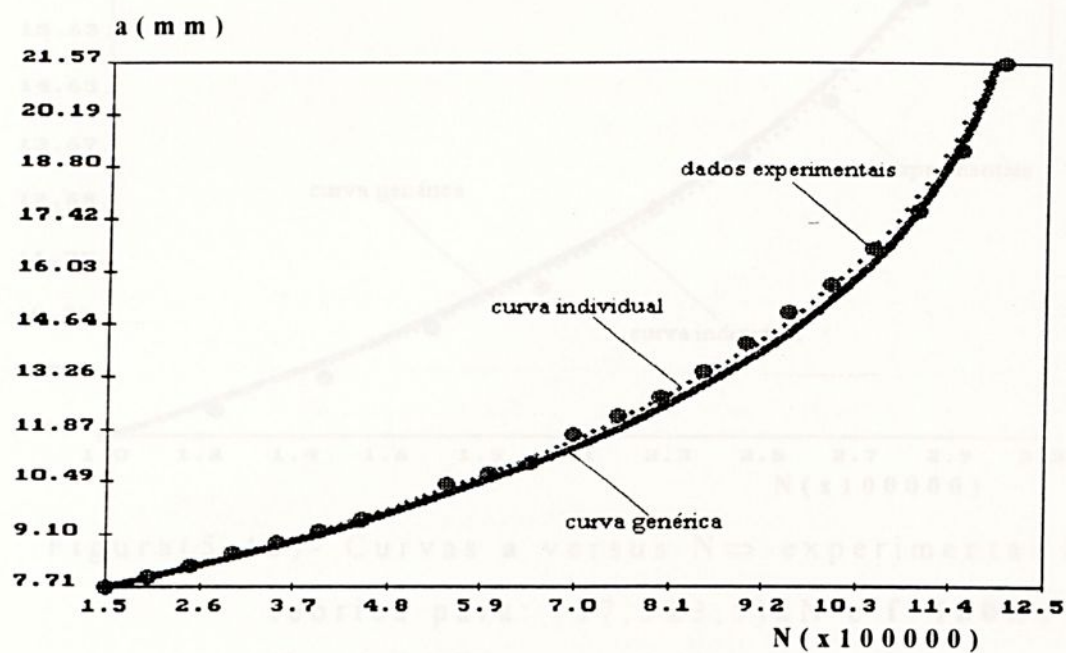


Figura(5.43)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0) \text{ kN}$  e  $f=90 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,10 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,84$ .

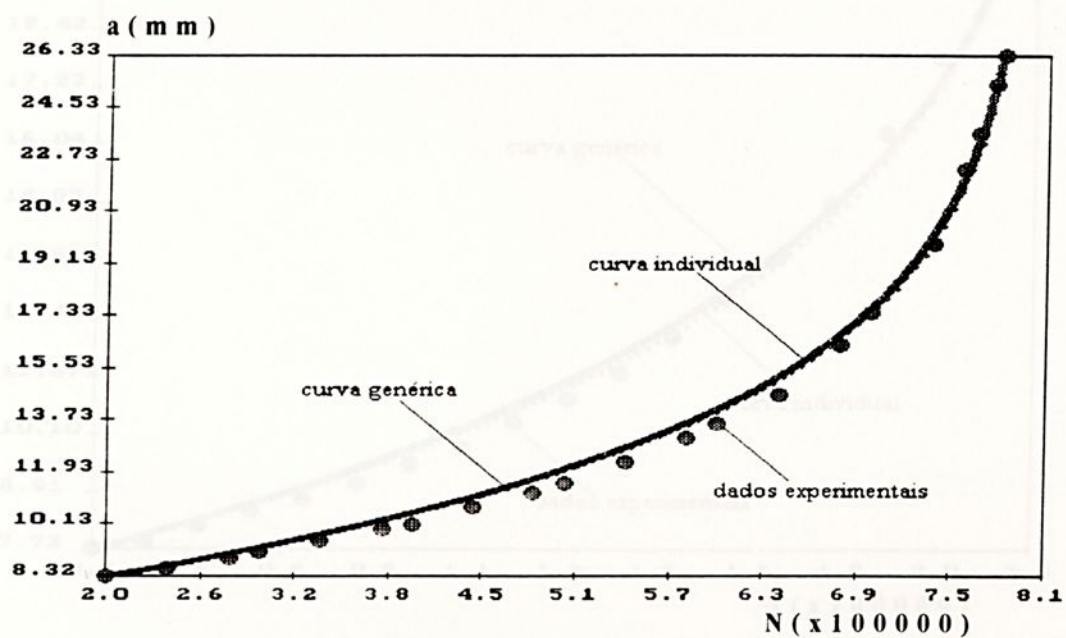


Figura(5.45)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e  $f=180 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=8,27 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,70$ .

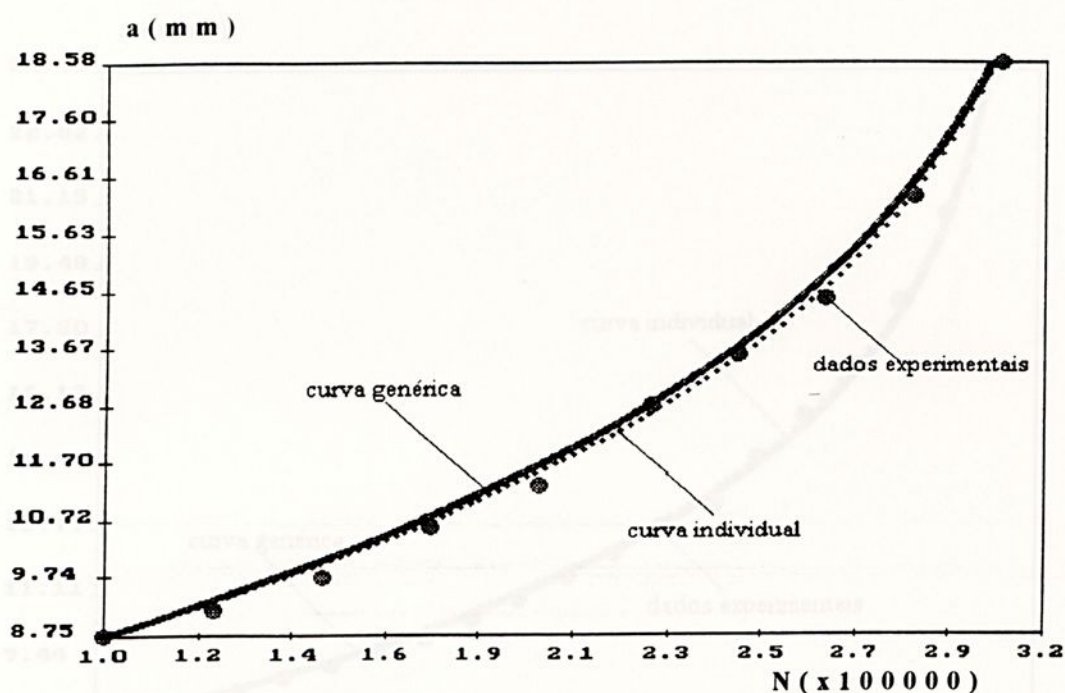
As figuras de (5.44) até (5.48) representam as curvas correspondentes aos diversos níveis de carregamento para a frequência de 180 Hz e  $n_{\text{medio}} = 1,70$ ; tabela (5.8).



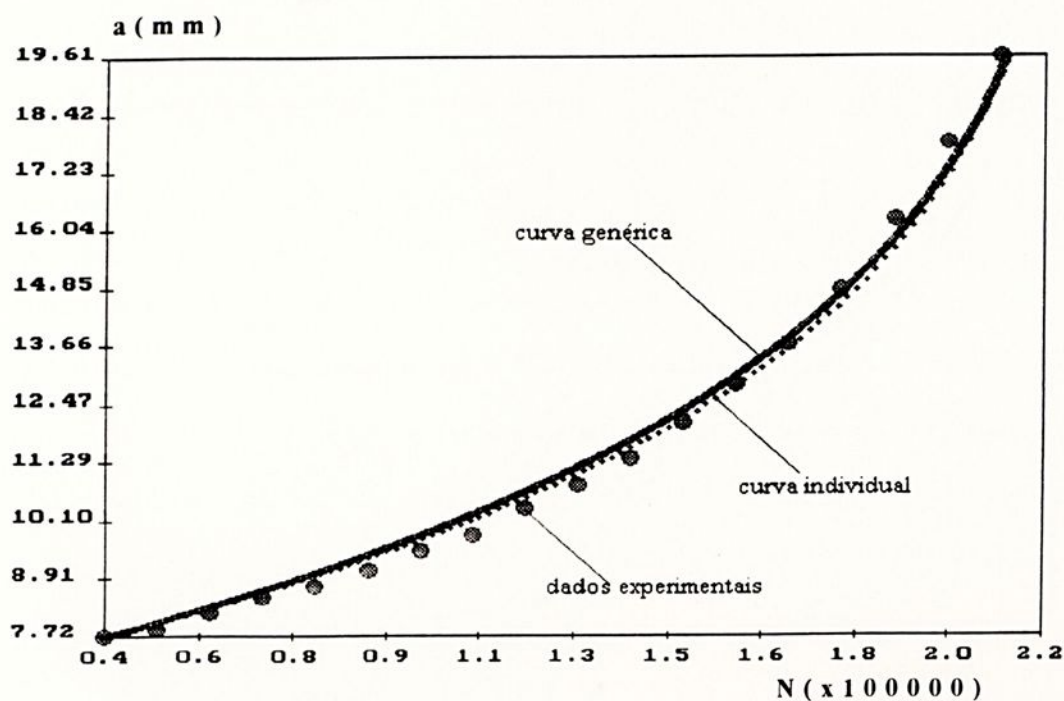
Figura(5.44)- Curvas a versus N⇒ experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=4,99 E^{-10}$  e  $n_{med.}=1,70$ .



Figura(5.45)- Curvas a versus N⇒ experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=8,27 E^{-10}$  e  $n_{med.}=1,70$ .

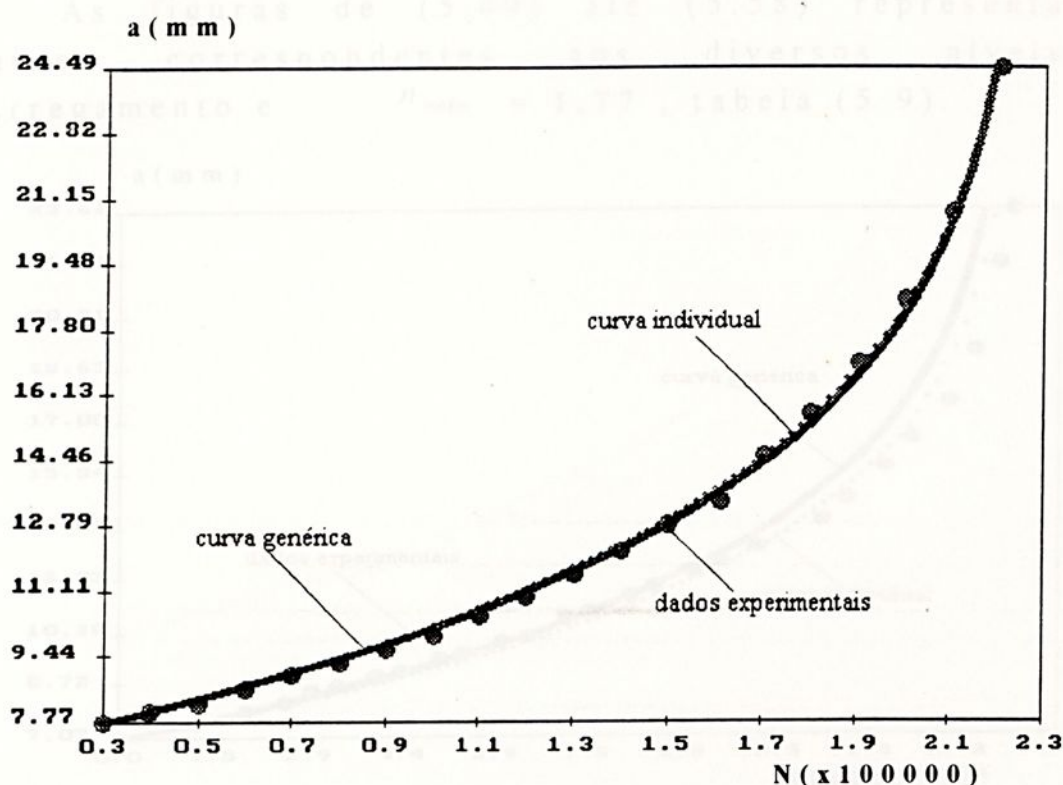


Figura(5.46)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=1,94 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,70$ .

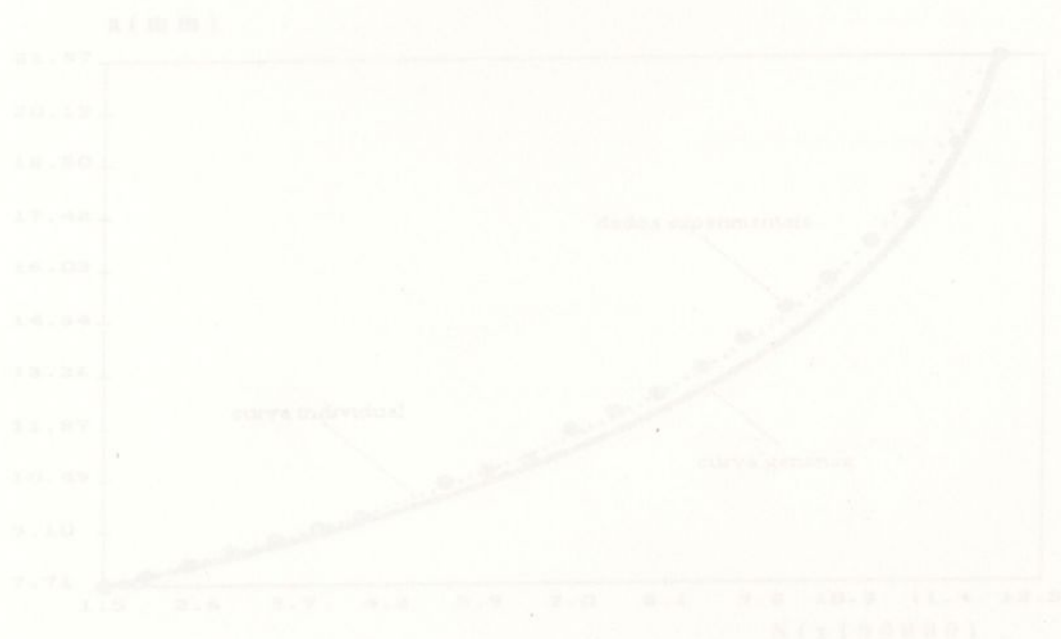


Figura(5.47)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=2,93 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,70$ .



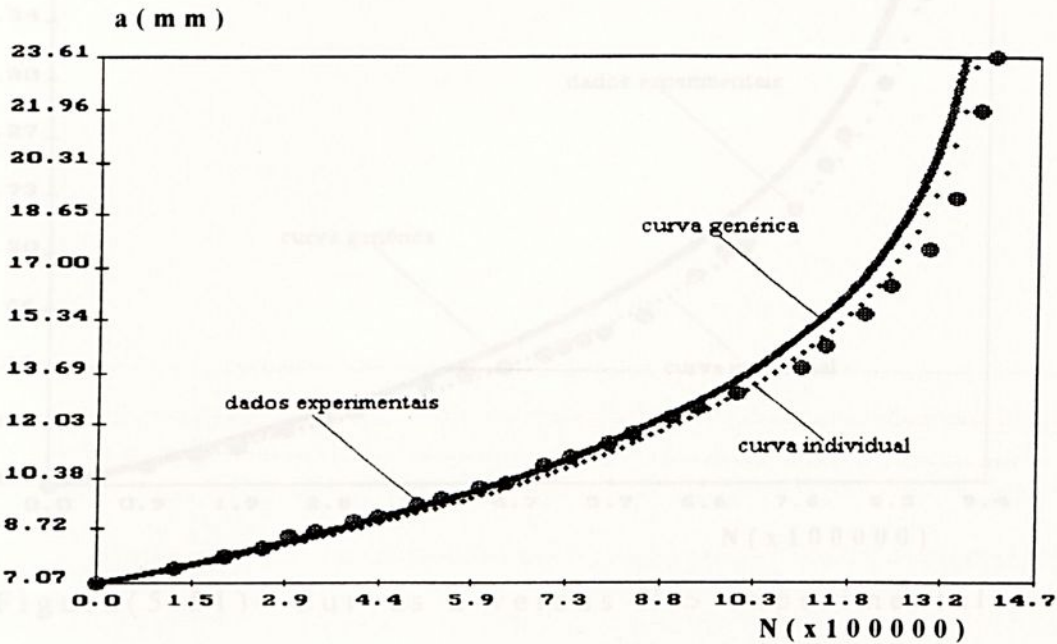


Figura(5.48)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0) \text{ kN}$  e  $f=180 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,53 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,70$ .

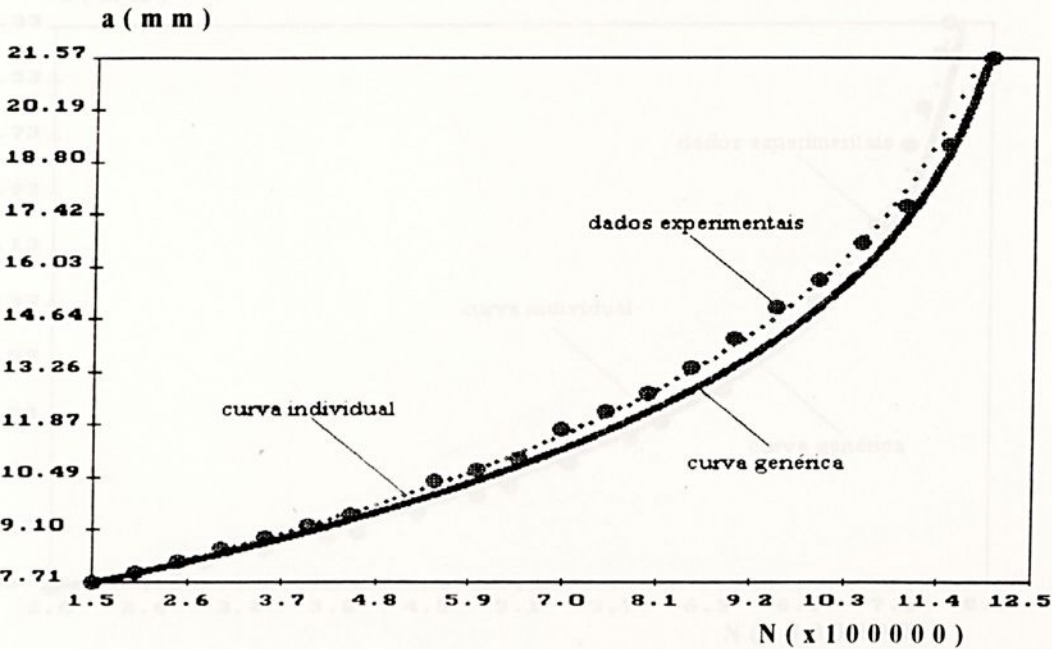


Figura(5.50)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0) \text{ kN}$  e  $f=180 \text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=4,37 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,70$ .

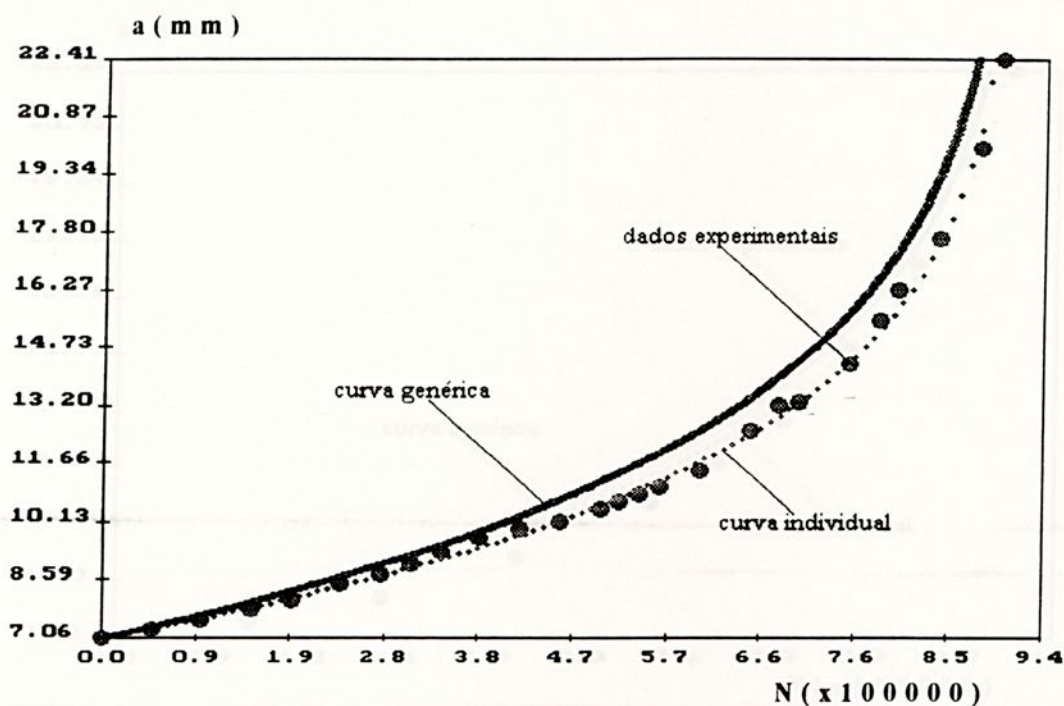
As figuras de (5.49) até (5.58) representam as curvas correspondentes aos diversos níveis de carregamento e  $n_{\text{medio}} = 1,77$  ; tabela (5.9).



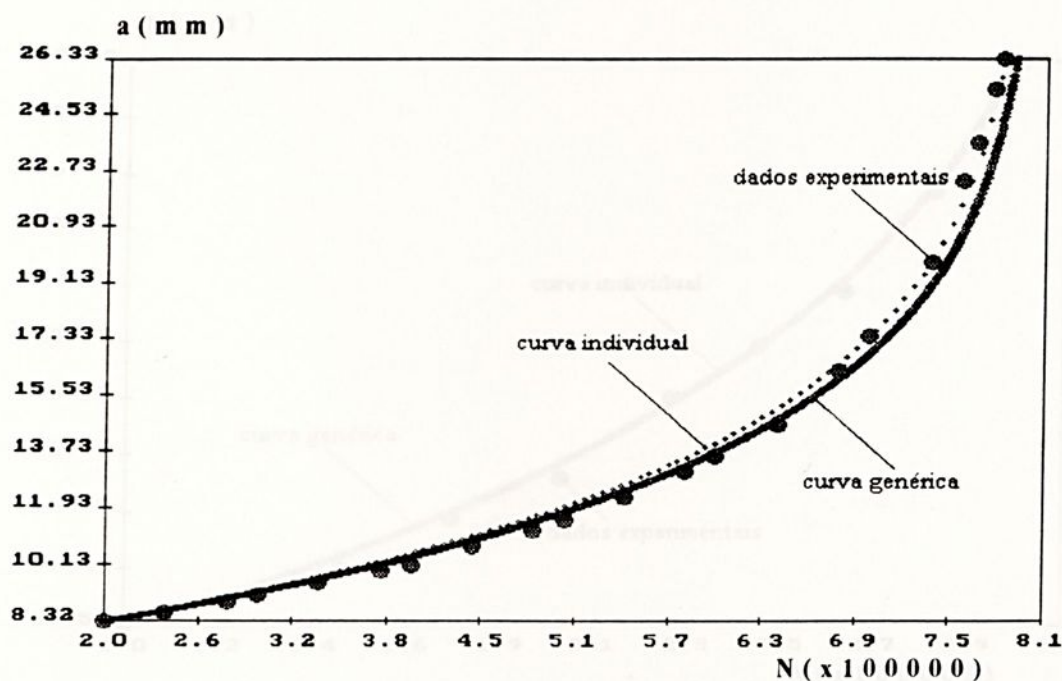
Figura(5.49)- Curvas a versus N⇒ experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=90$  Hz;  $C_{gen}=3,91 E^{-10}$  e  $n_{med.}=1,77$ .



Figura(5.50)- Curvas a versus N⇒ experimental e teórica para:  $(6,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=4,37 E^{-10}$  e  $n_{med.}=1,77$ .

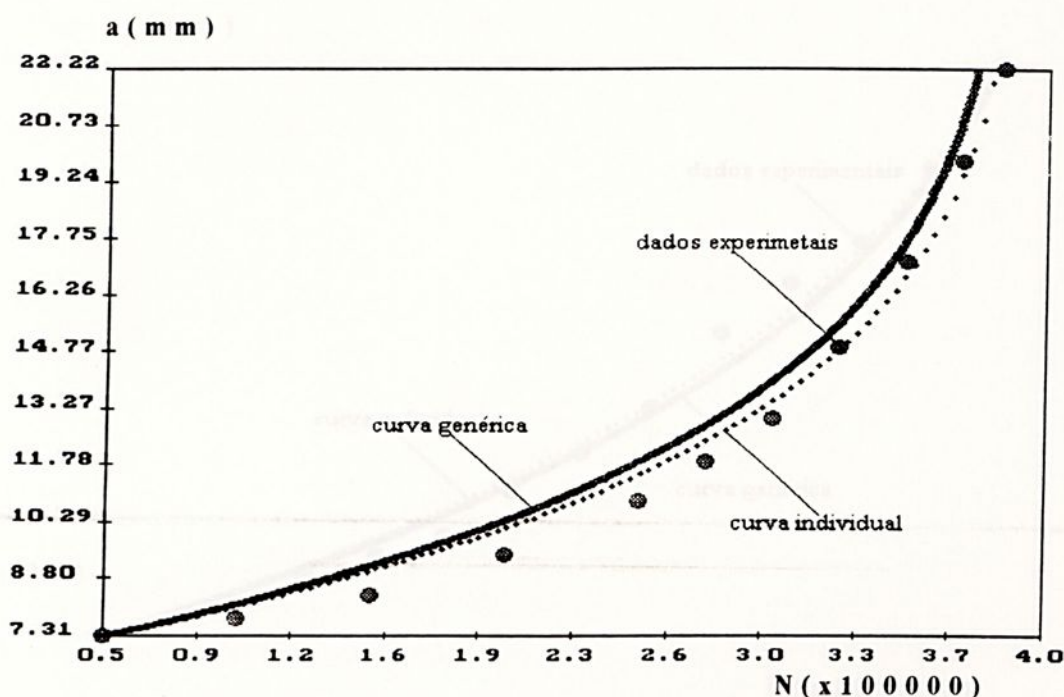


Figura(5.51)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=90$  Hz;  $C_{gen}=6,00 E^{-10}$  e  $n_{med}=1,77$ .

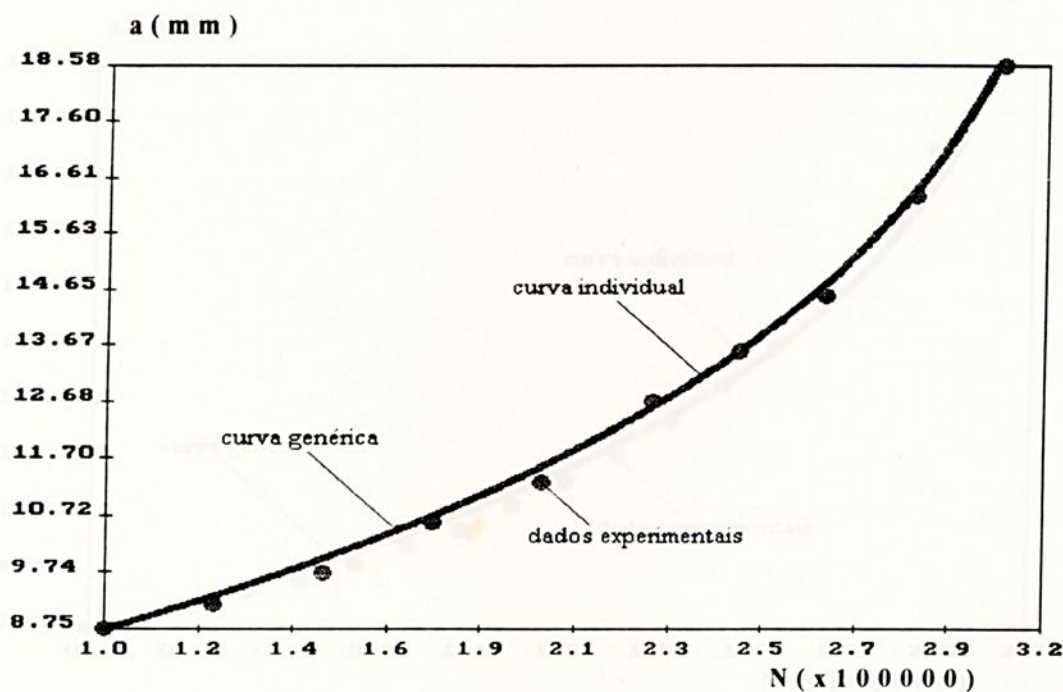


Figura(5.52)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(10,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=7,13 E^{-10}$  e  $n_{med}=1,77$ .

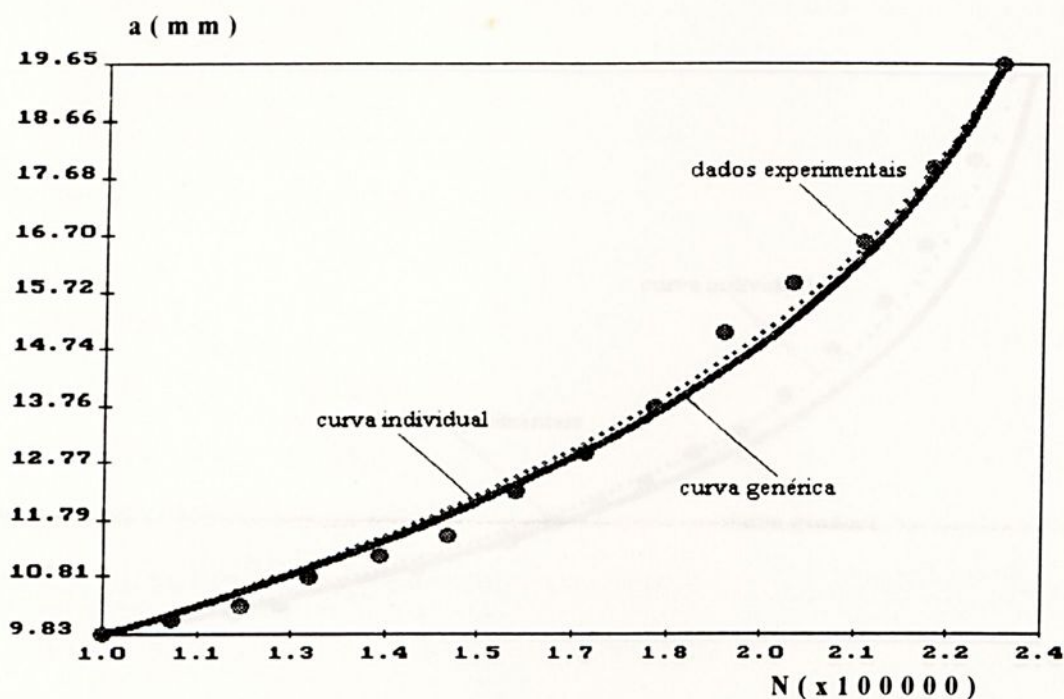




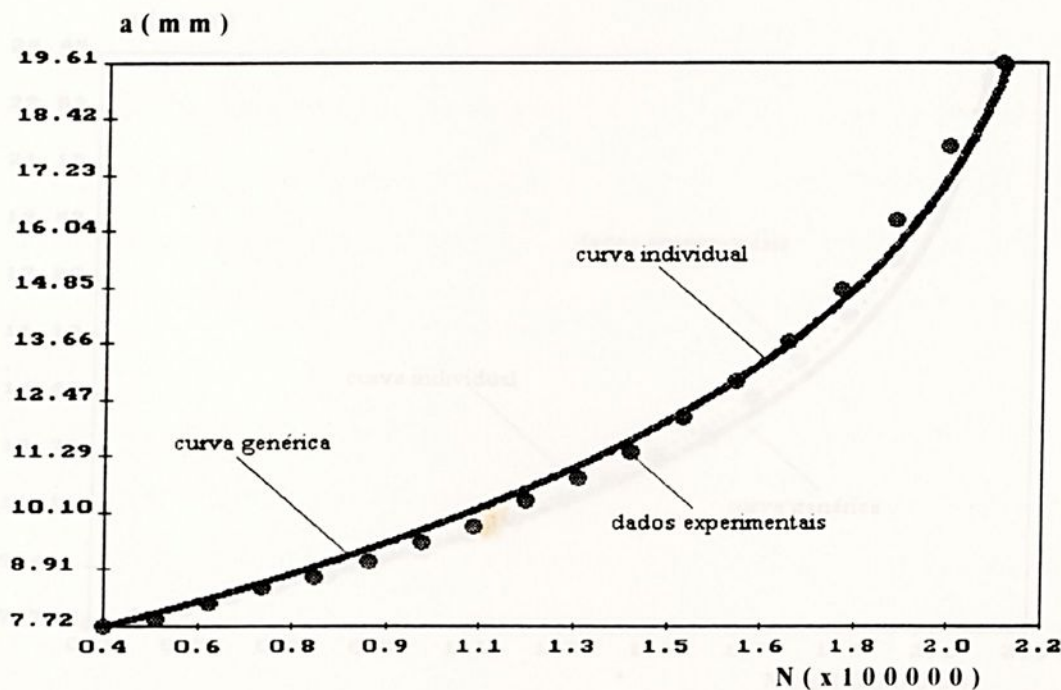
Figura(5.53)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=90$  Hz;  $C_{gen.}=1,54 E^{-9}$  e  $n_{med.}=1,77$ .



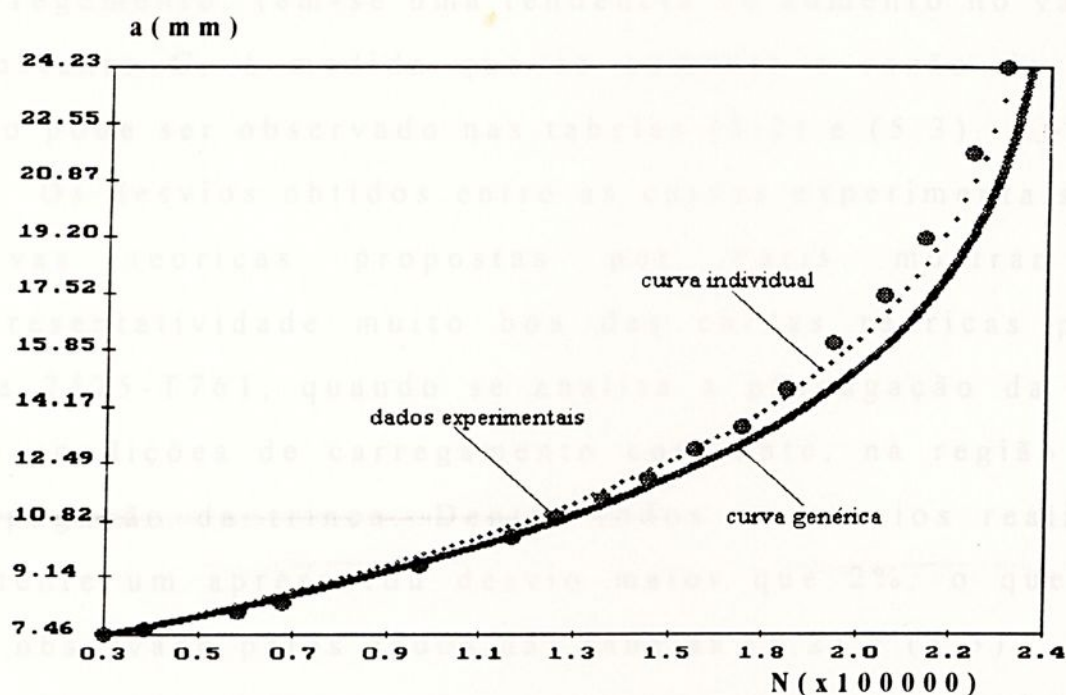
Figura(5.54)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(37,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen.}=1,70 E^{-9}$  e  $n_{med.}=1,77$ .



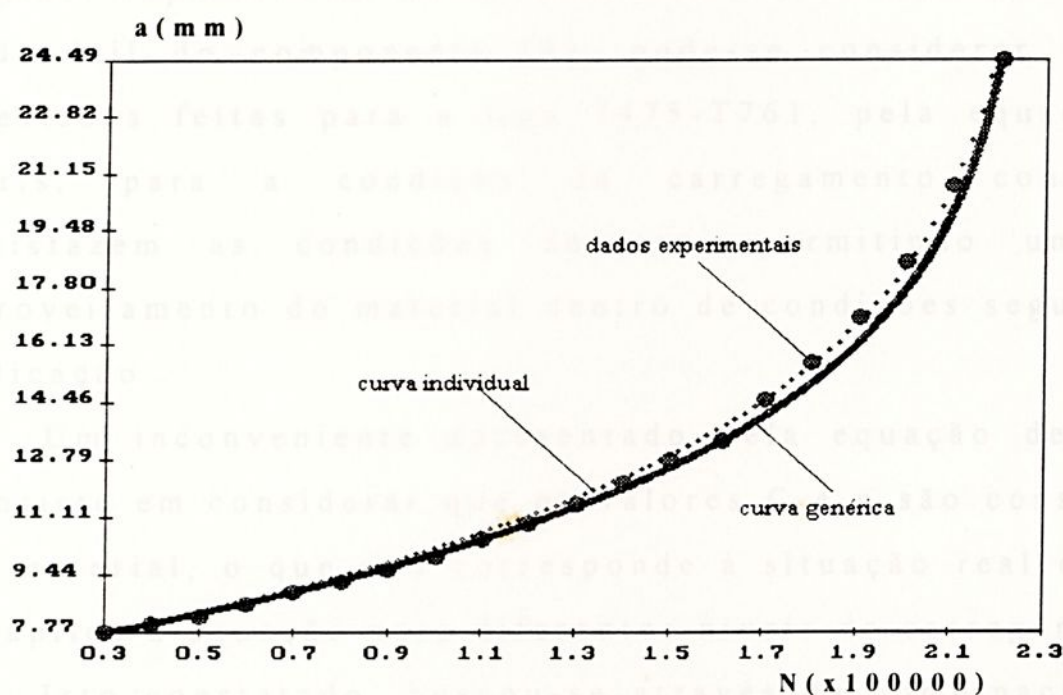
Figura(5.55)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=90$  Hz;  $C_{gen}=2,17 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,77$ .



Figura(5.56)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(51,5 \pm 3,5)$  kN e  $f=180$  Hz;  $C_{gen}=2,58 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,77$ .



Figura(5.57)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0)\text{ kN}$  e  $f=90\text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,30 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,77$ .



Figura(5.58)- Curvas  $a$  versus  $N \Rightarrow$  experimental e teórica para:  $(15,0 \pm 5,0)\text{ kN}$  e  $f=180\text{ Hz}$ ;  $C_{gen}=1,31 E^{-9}$  e  $n_{med}=1,77$ .



Pode-se observar que, para as mesmas amplitudes de carregamento, tem-se uma tendência de aumento no valor da constante  $C$ , à medida que se aumenta a razão de carga. Isto pode ser observado nas tabelas (5.2) e (5.3).

Os desvios obtidos entre as curvas experimentais e as curvas teóricas propostas por Paris mostram uma representatividade muito boa das curvas teóricas para a liga 7475-T761, quando se analisa a propagação da trinca sob condições de carregamento constante, na região II de propagação da trinca. Dentre todos os ensaios realizados somente um apresentou desvio maior que 2%, o que pode ser observado pelos dados das tabelas (5.2) e (5.3).

Considerando-se que a monitorização e as previsões de crescimento da trinca com o objetivo de se evitar a fratura, por questões de segurança, devem estar limitadas à região II, e que a nucleação e o crescimento da trinca nesta região, representam na maioria dos casos mais de 90% da vida útil do componente [9], pode-se considerar que as previsões feitas para a liga 7475-T761, pela equação de Paris, para a condição de carregamento constante, satisfazem às condições de uso, permitindo um bom aproveitamento do material dentro de condições seguras de aplicação.

Um inconveniente apresentado pela equação de Paris consiste em considerar que os valores  $C$  e  $n$  são constantes do material, o que não corresponde à situação real quando se aplica a equação para diferentes níveis de carregamento.

Isto constatado, buscou-se através da combinação dos resultados experimentais determinar os valores extremos desta variação para quantificar a sua amplitude e, com



isto, verificar a aplicabilidade da equação para diversos níveis de carregamento.

Para minimizar o número de variáveis, procurou-se determinar valores de  $C$  e  $n$  que permitissem manter um bom nível de representatividade da equação e, ao mesmo tempo, mantivesse fixa uma das mesmas, permitindo a variação da outra para ajuste da equação.

Para isto, foram feitas diversas combinações sob diversas condições de ensaio e, para cada combinação, adotou-se um valor de  $n_{\text{médio}}$ , permitindo-se a variação do valor de  $C$ .

Com este procedimento, foi possível determinar o espalhamento do valor de  $C$  e observar a representatividade dos valores de  $n_{\text{médio}}$ , para diversas condições de ensaio.

Na primeira combinação feita manteve-se a amplitude dos carregamentos e variou-se a frequência de aplicação das cargas, conforme pode ser observado na tabela (5.4).

Para a amplitude de 3,5 kN, foram obtidos valores de  $n$  para as diversas razões de carga e estes variaram de 1,72 até 1,92.

Para os dois ensaios realizados com amplitude de 5,0 kN, foi obtido  $n = 1,62$ .

Para esta combinação observam-se maiores desvios entre as curvas experimentais e teóricas, o que pode representar um efeito significativo da variação da frequência sobre a taxa de propagação da trinca. Este efeito será mais detalhadamente analisado no 2º programa de estudo.





Em outra combinação, foram mantidas constantes a frequência e a amplitude dos carregamentos, variando-se somente as razões de carregamento ( $R$ ).

Para a frequência de 90 Hz e amplitude de 3,5 kN, obteve-se um valor para  $n_{\text{médio}} = 1,90$ , correspondendo a um desvio máximo de 2,20% entre as curvas experimentais e teóricas, conforme pode ser observado na tabela (5.5).

Para a frequência de 180 Hz e amplitude de 3,5 kN, obteve-se um valor para  $n_{\text{médio}} = 1,72$ , correspondendo a um desvio máximo de 0,80% entre as curvas experimentais e teóricas, conforme pode ser observado na tabela (5.6).

Para a amplitude de 5,0 kN, foi obtido um valor de  $n = 1,62$ , para as duas amplitudes consideradas, obtendo-se um desvio máximo de 0,77%, entre as curvas experimentais e a curva teórica, conforme tabelas (5.5) e (5.6).

Outra combinação feita manteve a frequência e variou-se a amplitude do carregamento, sendo 4 ensaios na amplitude de 3,5 kN e 1 ensaio na amplitude de 5,0 kN, para as frequências de 90 Hz e 180 Hz. Para a frequência de 90 Hz, foi obtido um valor de  $n_{\text{médio}} = 1,84$ , com um desvio percentual máximo de 4,10%; para a frequência de 180 Hz, o valor de  $n_{\text{médio}} = 1,70$  e o desvio percentual máximo foi de 0,88%, conforme tabelas (5.7) e (5.8).

A última combinação feita agrupou todos os carregamentos e frequências em uma única análise, gerando como resultado um valor de  $n_{\text{médio}} = 1,77$  e um desvio percentual máximo de 3,40%, conforme tabela (5.9).

Dos resultados obtidos, foi possível observar que, para as condições de carregamento constante, um aumento na razão de carga provoca um aumento no valor de  $C$ .





Para os níveis de carregamento mais baixo, é observado um maior desvio entre as curvas teóricas e as experimentais.

Para as mesmas condições de carregamento, um aumento na frequência representou um aumento no valor de  $C$ .

Para os carregamentos com  $R = 0,5$ , os valores de  $C$  e  $n$  apresentam menores variações para a amplitude de carregamento maior.

Quando são considerados todos os ensaios, nas diversas condições de carregamento e frequência, foi obtido um valor de  $n_{\text{médio}} = 1,77$ . Para este valor de  $n_{\text{médio}}$ , na amplitude de 5,0 kN, foram obtidos os valores de  $C_{90\text{Hz}} = 1,30 E^{-9}$  e  $C_{180\text{Hz}} = 1,31 E^{-9}$  o que representa uma diferença muito pequena, podendo indicar uma menor sensibilidade ao efeito da frequência sobre esta condição de carregamento ou um comportamento mais homogêneo do material quando submetido a este nível de carregamento e amplitude. Para os demais ensaios na amplitude de 3,5 kN, a tendência de aumento do valor de  $C$ , para a frequência maior foi mantido.

O aumento do valor de  $C$ , quando se aumenta a razão de carga ( $R$ ), foi observado em todas as situações estudadas figuras (5.59 até 5.62), indicando que o aumento na razão de carga ( $R$ ) produz uma aceleração na taxa de propagação da trinca, refletindo no aumento do valor de  $C$  que ajusta a representatividade da curva teórica, mostrando que o simples crescimento da trinca não é suficiente para descrever a propagação da trinca em fadiga conforme proposto inicialmente por Paris [39].

À medida que se aumenta o valor de  $R$ , a variação no valor de  $C$  é acelerada, representando que a relação entre estes dois parâmetros não é linear.

Pode-se observar que para as mesmas condições de carregamento o valor de  $C$  é maior para as maiores frequências de carregamento o que indica que a frequência tem influência sobre a vida em fadiga do componente.

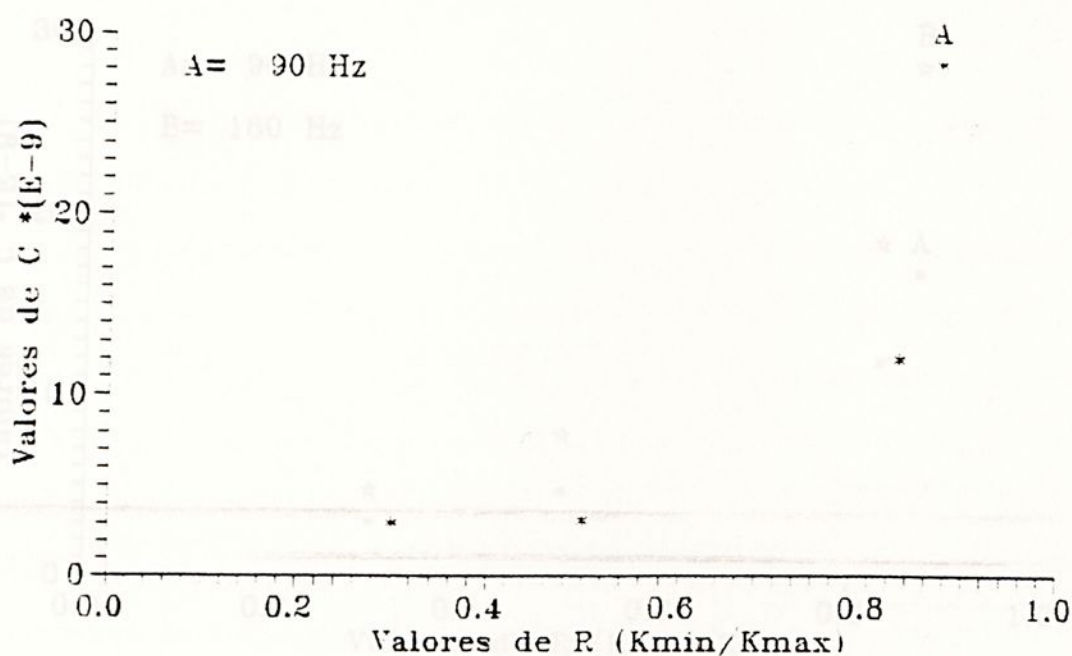
As figuras (5.59) e (5.60) mostram a relação entre os valores de  $C$  e a razão de carga ( $R$ ), para as frequências de 90Hz e 180Hz, respectivamente.

A figura (5.61), mostra a relação entre os valores de  $C$  e a razão de carga ( $R$ ), quando se varia a frequência do carregamento para a condição de  $n_{\text{médio}}$  para 90Hz e  $n_{\text{médio}}$  para 180Hz.

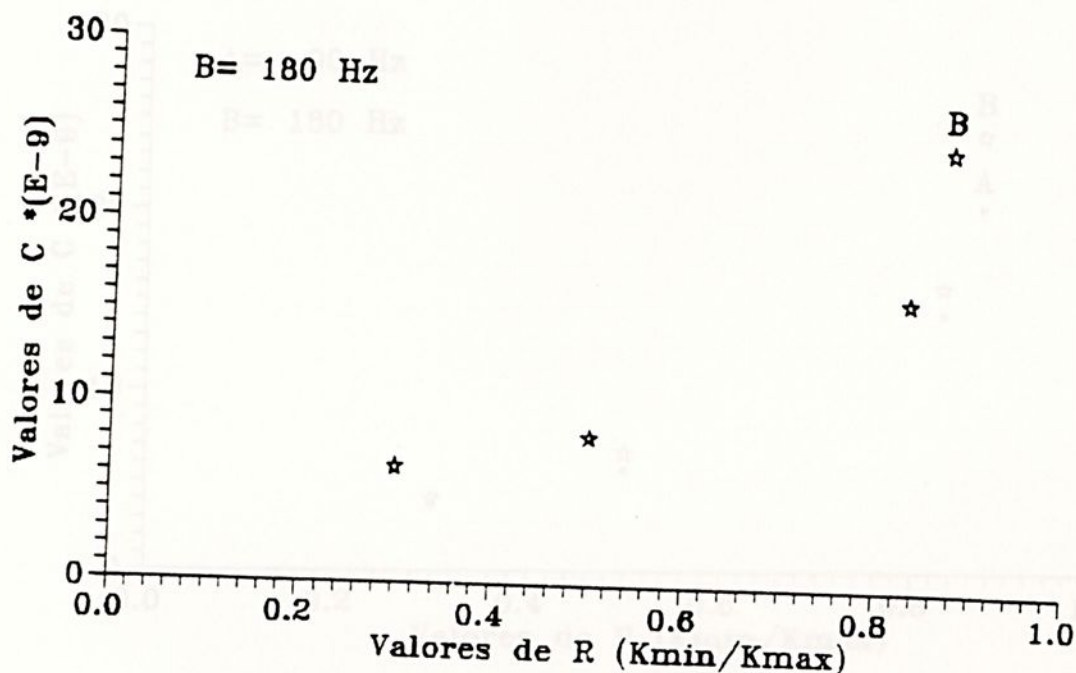
A figura (5.62), mostra a relação entre os valores de  $C$  e a razão de carga ( $R$ ), quando se varia a frequência do carregamento para a condição de  $n_{\text{médio}}$  comum para as duas frequências estudadas.



Figura(5.60)- Curva C x razão de carga ( $R$ ) para a frequência de 180Hz

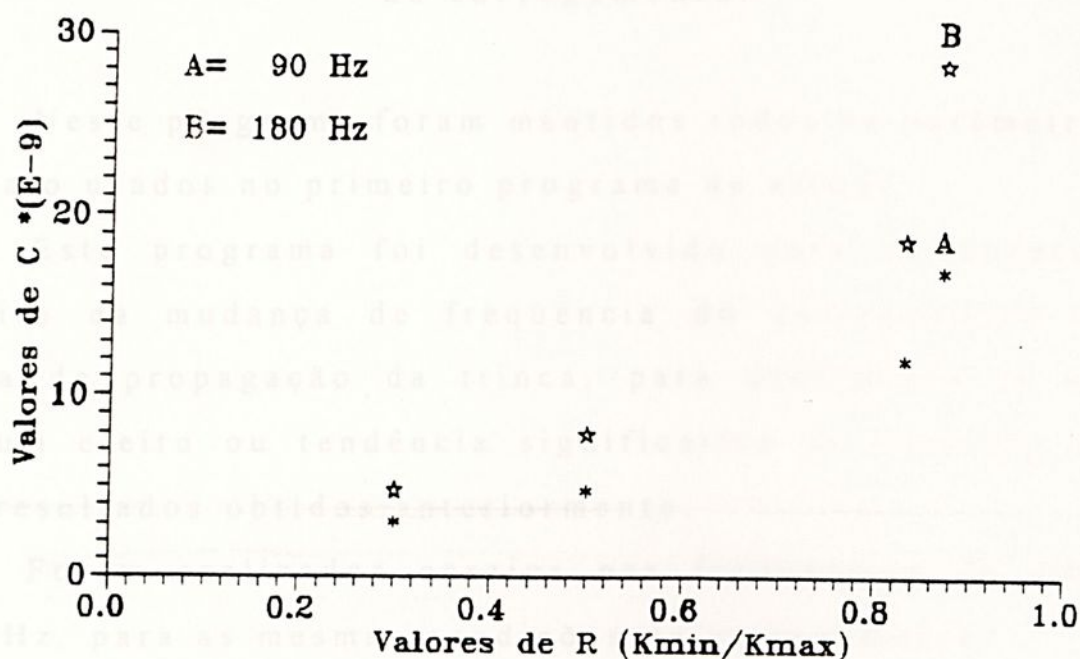


Figura(5.59)- Curva C x razão de carga (R) para a frequência de 90Hz

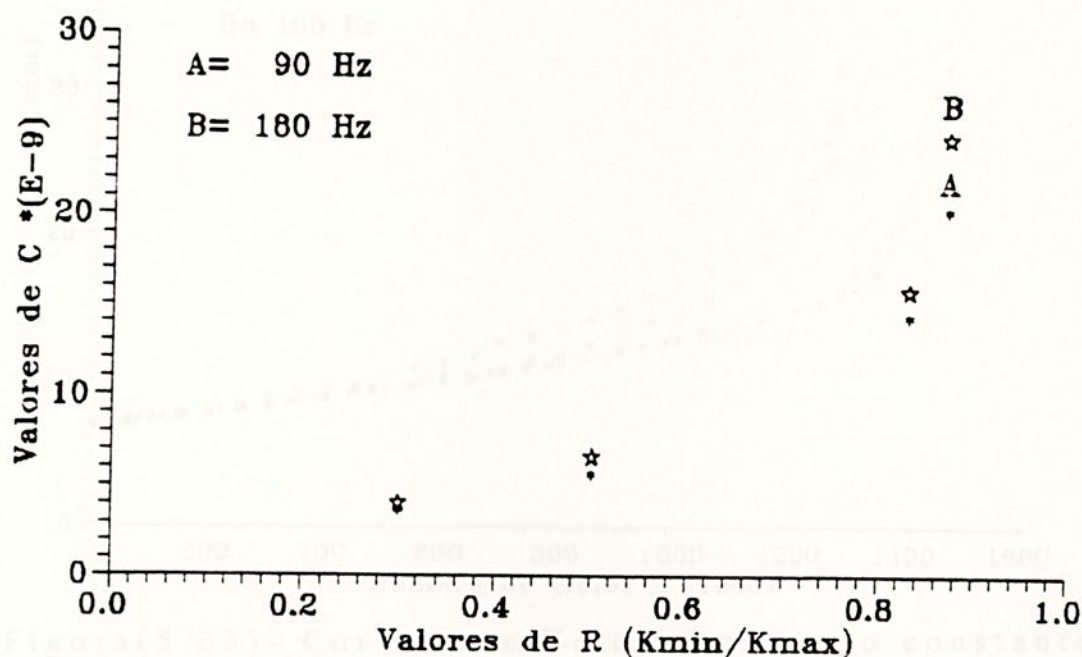


Figura(5.60)- Curva C x razão de carga (R) para a frequência de 180Hz





Figura(5.61)- Curvas C x razão de carga (R) para a  $n_{\text{medio}} = 1,90$  (90Hz) e  $n_{\text{medio}} = 1,72$  (180Hz)



Figura(5.62)- Curvas C x razão de carga (R) para a  $n_{\text{medio}} = 1,81$  (90Hz e 180Hz)

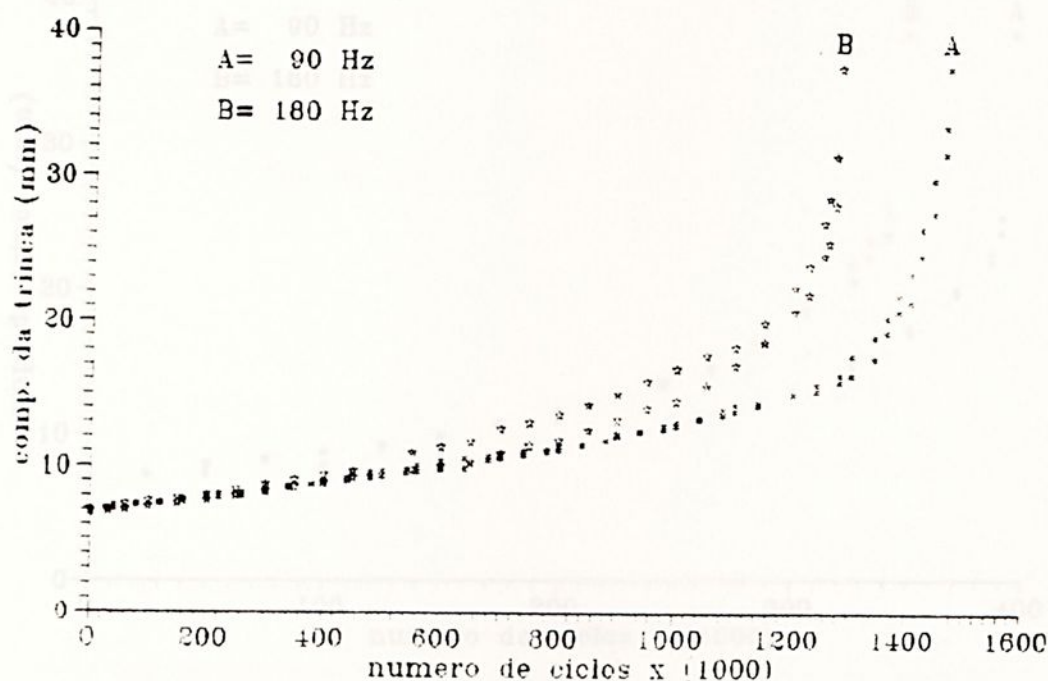
### 5.2.2- 2º programa de estudo: O efeito da frequência do carregamento.

Neste programa foram mantidos todos os parâmetros de ensaio usados no primeiro programa de estudo.

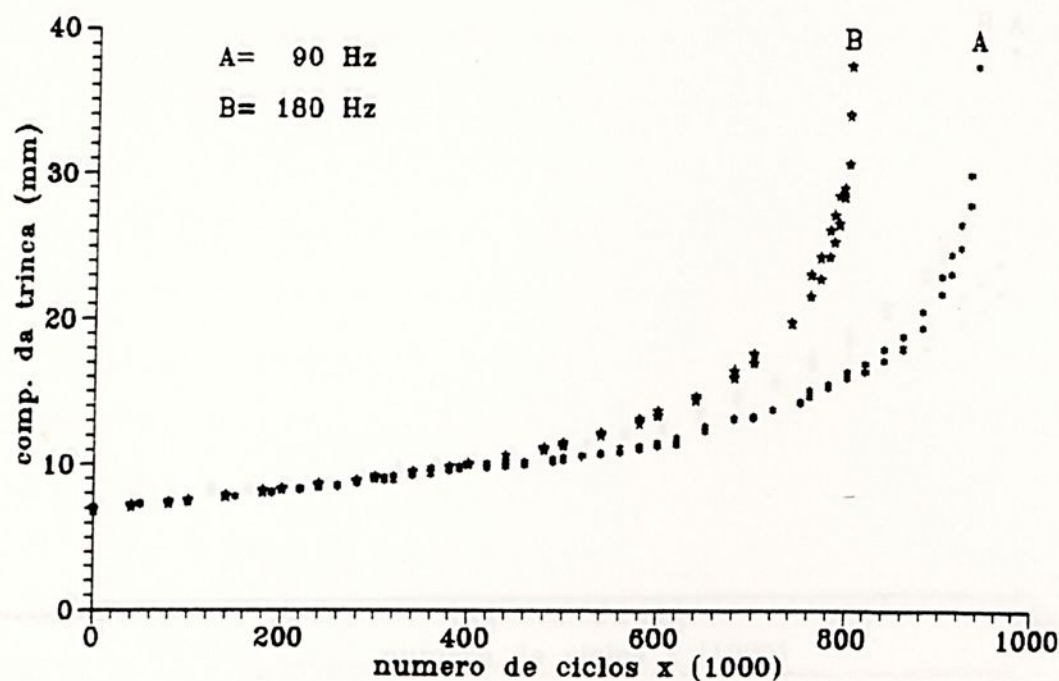
Este programa foi desenvolvido para se observar o efeito da mudança de frequência do carregamento sobre taxa de propagação da trinca, para determinar se existe algum efeito ou tendência significativa de variação sobre os resultados obtidos anteriormente.

Foram realizados ensaios nas frequências de 90Hz e 180Hz, para as mesmas condições de carregamento.

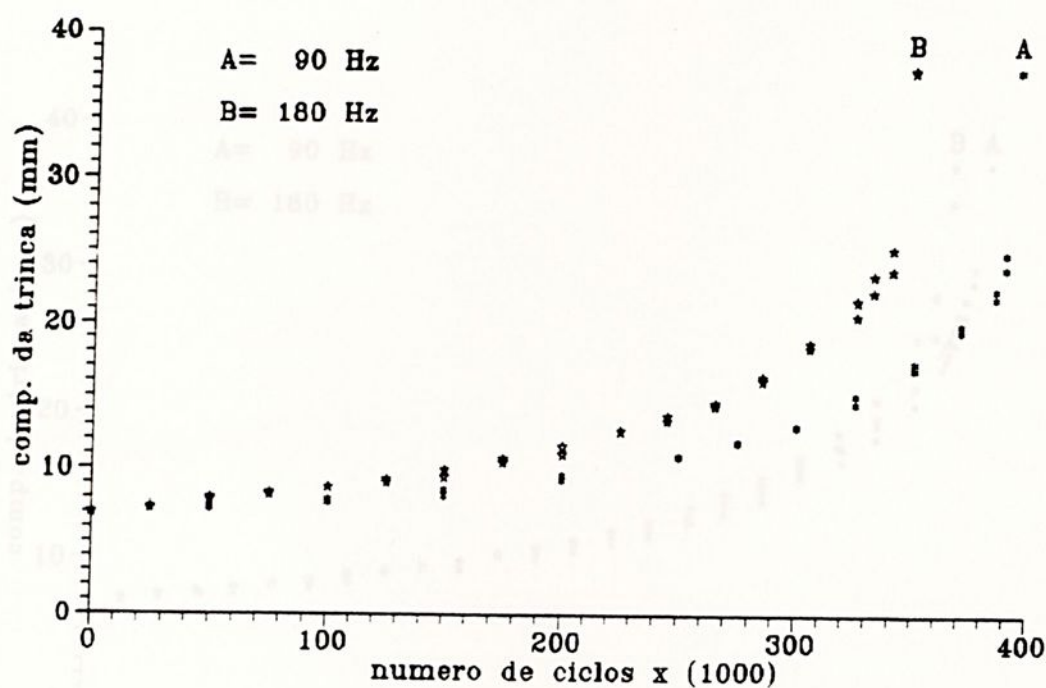
As curvas  $a$  versus  $N$ , representativas das duas frequências ensaiadas podem ser observadas nas figuras de (5.63) a (5.67).



Figura(5.63)- Curvas  $a$  x  $N \Rightarrow$  carregamento constante  $(6,5 \pm 3,5) \text{ kN}$  e frequência variável (90Hz e 180Hz)

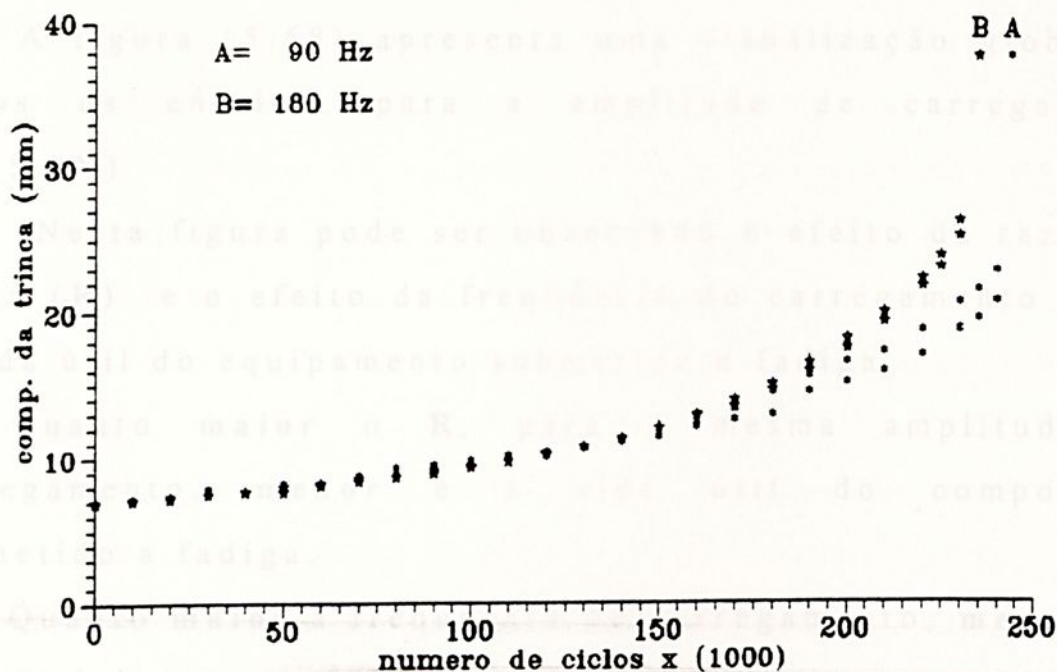


Figura(5.64)- Curvas a x N  $\Rightarrow$  carregamento constante  $(10,5 \pm 3,5)$  kN e frequência variável (90 Hz e 180 Hz)



Figura(5.65)- Curvas a x N  $\Rightarrow$  carregamento constante  $(37,5 \pm 3,5)$  kN e frequência variável (90 Hz e 180 Hz)

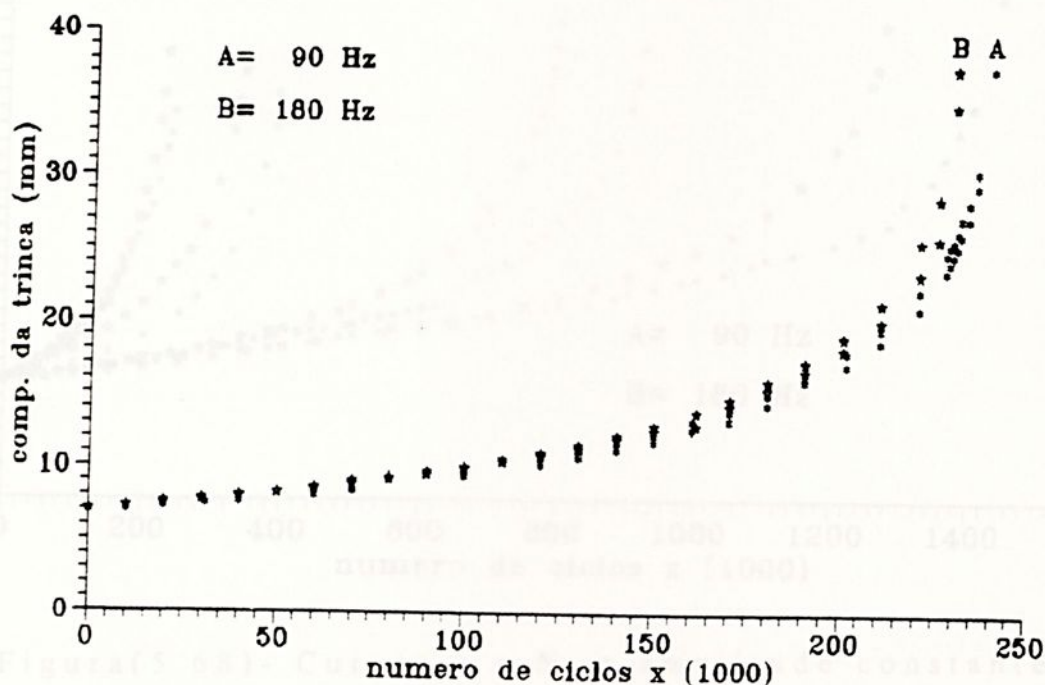




Figura(5.66)- Curvas a x N  $\Rightarrow$  carregamento constante

( $51,5 \pm 3,5$ ) kN e frequência variável (90 Hz e

180 Hz)



Figura(5.67)- Curvas a x N  $\Rightarrow$  carregamento constante

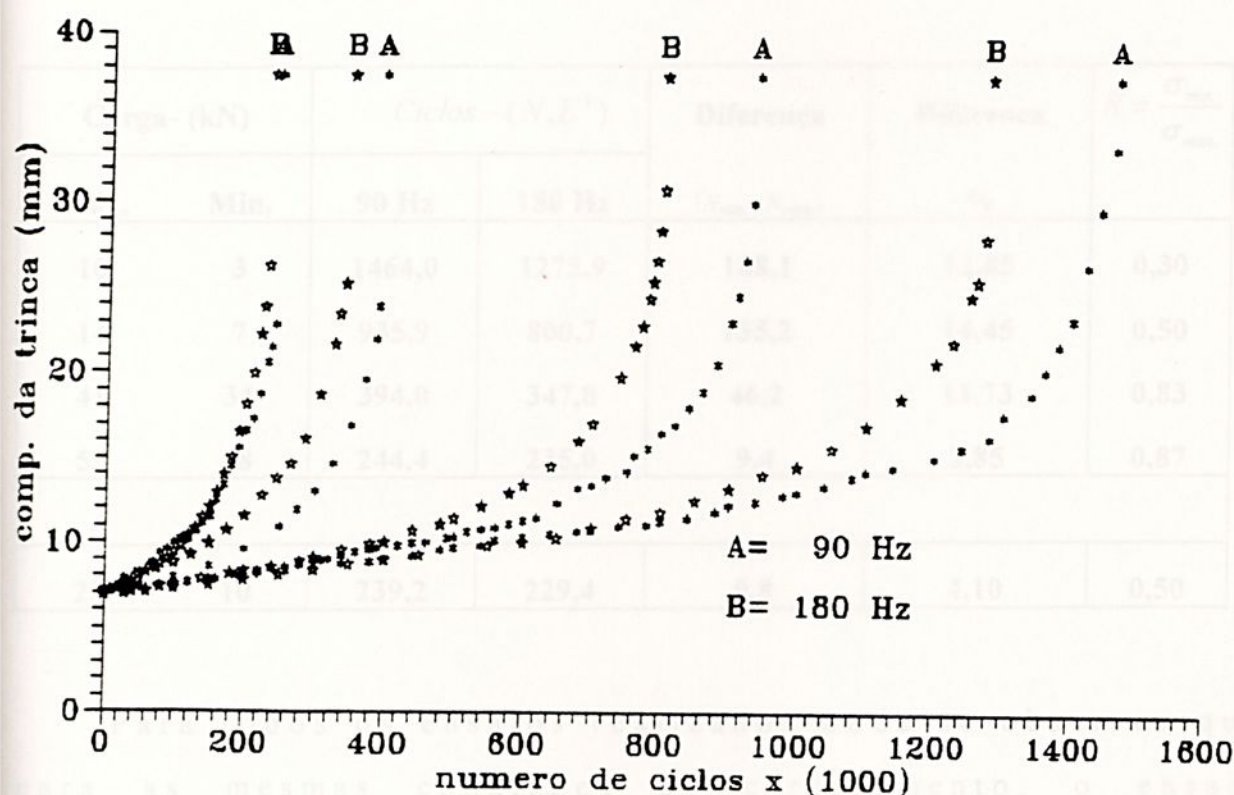
( $15,0 \pm 5,0$ ) kN e frequência variável (90 Hz e 180 Hz)

A figura (5.68) apresenta uma visualização global de todos os ensaios, para a amplitude de carregamento ( $\pm 3,5$  kN).

Nesta figura pode ser observado o efeito da razão de carga (R) e o efeito da frequência do carregamento sobre a vida útil do equipamento submetido a fadiga.

Quanto maior o R, para a mesma amplitude de carregamento, menor é a vida útil do componente submetido a fadiga.

Quanto maior a frequência do carregamento, menor é a vida útil do componente submetido a fadiga.



Figura(5.68)- Curvas a x N  $\Rightarrow$  amplitude constante, carregamento e frequência variáveis.

Da análise das figuras (5.63 a 5.68) pode-se observar uma tendência de aumento na taxa de propagação da trinca quando se aumenta a frequência do carregamento. O efeito da frequência é tanto mais significativo quanto menor o nível de carregamento aplicado, o que pode ser observado na maior variação entre os ciclos necessários para romper o material.

A tabela (5.11) representa os diferentes números de ciclos consumidos para a ruptura dos corpos de prova nas diversas condições de carregamento.

Tabela(5.11)-Efeito da frequência de carregamento sobre a taxa de crescimento de trinca.

| Carga- (kN) |      | Ciclos - ( $N.E^3$ ) |        | Diferença<br><br>( $N_{90Hz} - N_{180Hz}$ ) | Diferença<br><br>% | $R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{max.}}$ |
|-------------|------|----------------------|--------|---------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|
| Máx.        | Min. | 90 Hz                | 180 Hz |                                             |                    |                                           |
| 10          | 3    | 1464,0               | 1275,9 | 188,1                                       | 12,85              | 0,30                                      |
| 14          | 7    | 935,9                | 800,7  | 135,2                                       | 14,45              | 0,50                                      |
| 41          | 34   | 394,0                | 347,8  | 46,2                                        | 11,73              | 0,83                                      |
| 55          | 48   | 244,4                | 235,0  | 9,4                                         | 3,85               | 0,87                                      |
|             |      |                      |        |                                             |                    |                                           |
| 20          | 10   | 239,2                | 229,4  | 9,8                                         | 4,10               | 0,50                                      |

Para todos os ensaios realizados pode-se observar que para as mesmas condições de carregamento, o ensaio realizado na maior frequência produziu a fratura em um menor número de ciclos, o que parece demonstrar que o aumento da frequência provoca um aumento na taxa de propagação da trinca, independentemente da razão de carregamento considerada.





A análise dos dados sugere que o efeito da frequência é tanto mais significativo quanto menor a razão de carga considerada para uma mesma amplitude de carregamento.

Para a amplitude de 3,5 kN pode ser observado que, quanto menor a razão de carga ( $R$ ) maior a diferença do número de ciclos necessários à fratura do material, ou seja, para  $R = 0,87$  verifica-se a diferença  $(N_{9Hz} - N_{8Hz}) = 9,4 \cdot E^3$  ciclos e, para a menor razão  $R = 0,30$  tem-se a diferença  $(N_{9Hz} - N_{8Hz}) = 188,1 \cdot E^3$  ciclos.

Considerando todas as diferenças, para todos os níveis de carregamentos ensaiados, obtém-se uma diferença percentual média maior que 10% entre o número de ciclos necessários para fraturar o material, o que indica que, para o alumínio 7475-T761 nas condições em que os ensaios foram realizados, o aumento da frequência do carregamento ( $freq_2 = 2 \cdot freq_1$ ), provocou uma redução de  $\approx 11,72\%$  na vida total do componente. Isto indica que a influência da frequência é um fator importante a ser considerado na análise da vida total de um componente submetido a fadiga.

Observando os gráficos  $a \times N$ , para as duas frequências de ensaio pode-se considerar que a influência das frequências começa a ser identificada na Região II de propagação da trinca, porém, seu efeito é tanto mais significativo quanto maior o tamanho da trinca, ou seja, quanto maior o tamanho da trinca, maior o efeito da variação da frequência e, conseqüentemente, maior a taxa de propagação da trinca no material submetido a maior frequência.



Outra consideração a ser feita é a relação direta entre frequência do carregamento e a razão de carga ( $R$ ). É possível observar nas figuras (5.63 a 5.68) que o efeito é menos significativo quanto maior a razão de carga ( $R$ ).

Para maiores amplitudes de carregamento, o efeito da frequência parece ser menos significativo. Isto pode ser observado quando se comparam as diferenças percentuais encontradas para as amplitudes de 3,5 kN e 5,0 kN. Para a amplitude de 3,5 kN foi obtida uma diferença percentual entre o número de ciclos de 14,45%, enquanto que, para a amplitude de 5,0 kN foi obtida uma diferença de apenas 4,10% conforme tabela (5.10).

Para a realização dos ensaios foi adotada a frequência de 99Hz, que representa a menor frequência possível de se obter com o equipamento para as condições em que os ensaios foram realizados e a que mais se aproxima das frequências de carregamento usadas na maioria das aplicações práticas.

Neste programa foram realizadas análises para diversas razões de sobrecarga ( $R$ ), com o objetivo de observar o efeito de interação "retardo", isto é, quantificar as razões extremas de carregamento que permitam identificar a razão de sobrecarga limite inferior que ainda provoca o efeito de retardo e, por outro extremo, identificar a razão de sobrecarga limite superior para provocar o retardo total. Os ensaios foram realizados com o carregamento de amplitude constante, conforme carregamento de referência [37].





### 5.3- SEGUNDO PROGRAMA DE ENSAIOS

No segundo programa foram realizados ensaios de fadiga com amplitude variável para diversas razões de sobrecarga  $\left(R_{sc} = \left(\frac{\sigma_{\max sc}}{\sigma_{\max ref}}\right)\right)$ , nas condições de 1 pico de sobrecarga e blocos de sobrecarga.

Para este programa de ensaios foi adotado como carregamento cíclico de referência, o valor  $(15,0 \pm 5,0) \text{ kN}$ .

A escolha deste carregamento deveu-se a menor dispersão observada entre os valores de  $C_{genérico}$  para  $n_{médio}$  e pela boa representatividade nos ensaios com amplitude constante apresentado no programa de ensaio anterior.

Para a realização dos ensaios foi adotada a frequência de  $90 \text{ Hz}$ , que representa a menor frequência possível de se obter com o equipamento para as condições em que os ensaios foram realizados e a que mais se aproxima das frequências de carregamento usadas na maioria das aplicações práticas.

Neste programa foram realizados ensaios para diversas razões de sobrecarga ( $R_{sc}$ ), com o objetivo de observar o efeito de interação "retardo", além de quantificar as razões extremas de carregamento que permitam identificar a razão de sobrecarga limite inferior, que ainda provoca o efeito do retardo e, no outro extremo, identificar a razão de sobrecarga limite superior, para provocar a parada total no crescimento de trinca, quando submetida a um carregamento de amplitude constante, conforme carregamento de referência [37].





A importância da obtenção destes valores está relacionado ao projeto e desenvolvimento de componentes que estarão submetidos a carregamentos de amplitude variável, quando em condições normais de trabalho, dos quais se conhece o espectro de carregamento. Em função destes valores, é possível dimensionar os componentes considerando-se as condições de carregamento que podem proporcionar um aumento na vida útil do componente ou ainda, em situações limites, impedir o aparecimento ou a propagação de trincas de fadiga [37].

Para a análise do efeito do retardo, foram realizados ensaios com apenas um pico de sobrecarga, gerando o menor retardo possível e com blocos de sobrecarga, na condição de saturação cíclica, gerando o máximo de retardo para as condições de carregamento e de tamanhos de trinca ensaiados.

Resultados obtidos com o alumínio 2024-T3, determinaram que o número de ciclos de saturação para este material se situa entre 10 e 50 ciclos de sobrecarga [37].

Neste programa de ensaios, foram aplicados blocos de sobrecarga com números variáveis de ciclos; porém, em nenhum dos casos este número foi inferior a 700 ciclos de sobrecarga, o que, por comparação com os dados do alumínio 2024-T3, permite supor ter sido atingido o número de ciclos de saturação em todos os ensaios realizados com o alumínio 7475-T761.

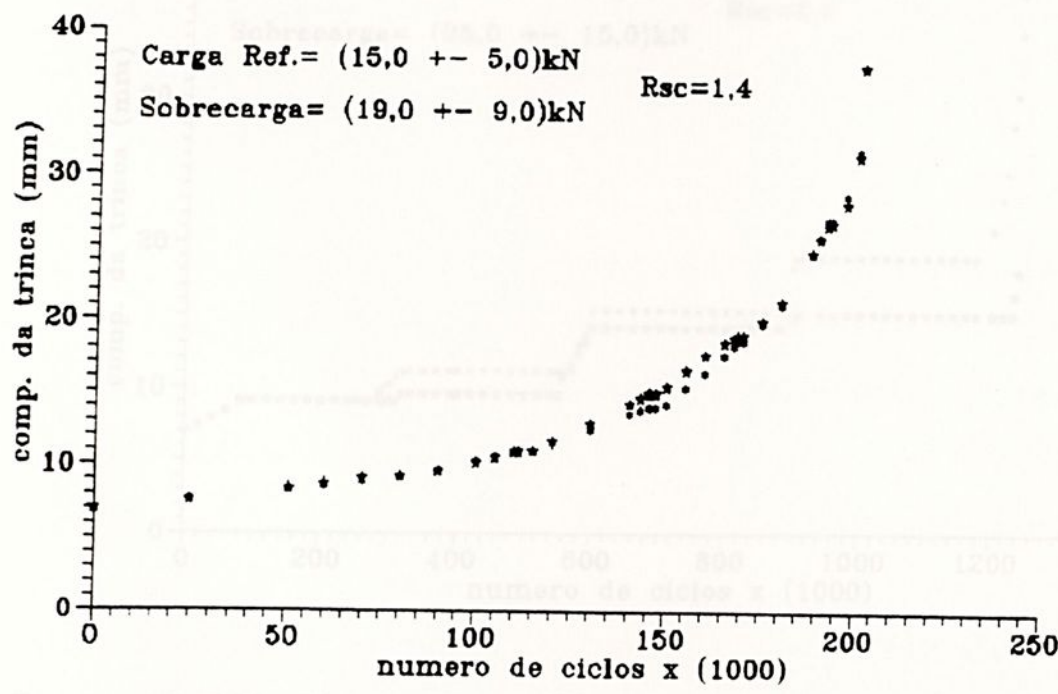
Os ensaios com um pico de sobrecarga foram realizados para as razões de sobrecarga ( $R_{sc}$ ) de 1,4, 1,8 e 2,0. A tabela (5.12) apresenta os resultados médios



encontrados e as curvas representativas destes ensaios podem ser observadas nas figuras (5.69), (5.70) e (5.71), respectivamente.

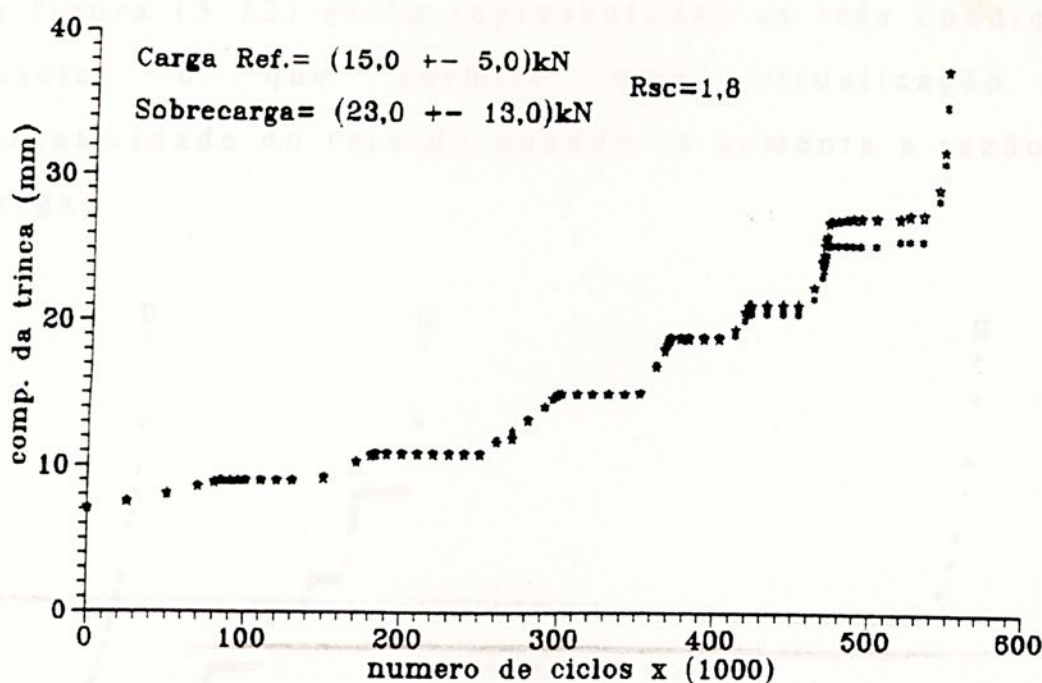
Tabela(5.12)- Efeito do retardo para picos de sobrecarga

| Carreg. Ref. (kN) |      | Carreg. Sc. (kN) |      | Ciclos Médios Retardo | ( % ) na Vida | Tipo de Sobrecarga | R <sub>sc.</sub> |
|-------------------|------|------------------|------|-----------------------|---------------|--------------------|------------------|
| máx.              | mín. | máx.             | mín. |                       |               |                    |                  |
| 20                | 10   | 28               | 10   | 2200                  | 1             | Pico               | 1,4              |
|                   |      | 36               | 10   | 48000                 | 21            | Pico               | 1,8              |
|                   |      | 40               | 10   | 220750                | 96            | Pico               | 2,0              |

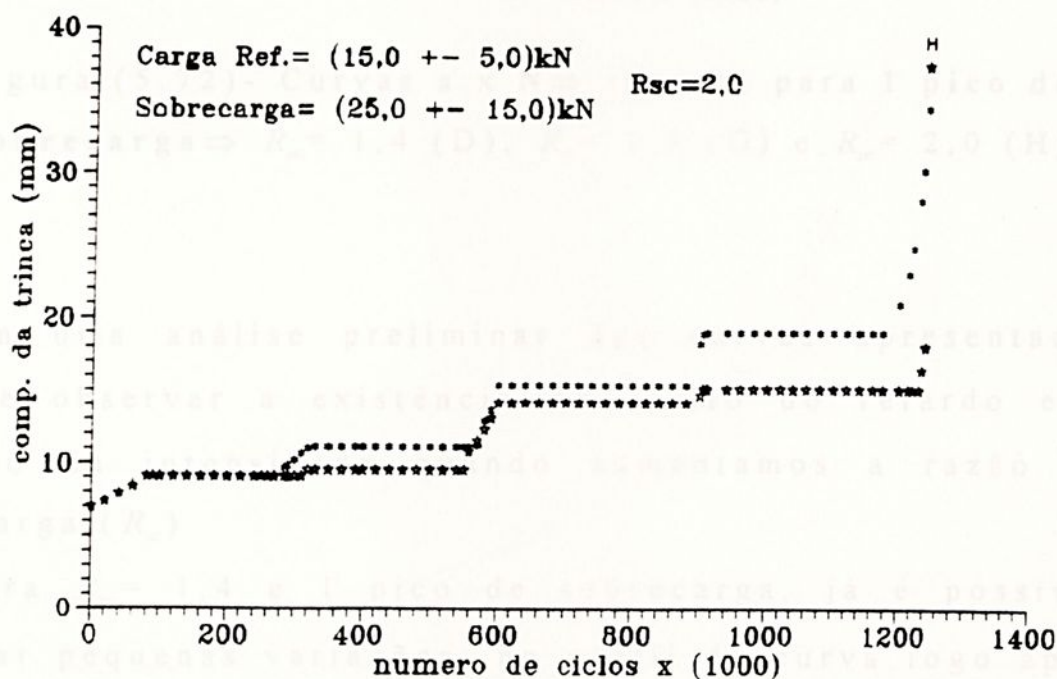


Figura(5.69)- Curvas a x N⇒ carregamento de amplitude variável com 1 pico de sobrecarga para R<sub>sc</sub> = 1,4.





Figura(5.70)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com 1 pico de sobrecarga para  $R_{sc} = 1,8$ .



Figura(5.71)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com 1 pico de sobrecarga para  $R_{sc} = 2,0$ .



Na figura (5.72) estão representadas as três condições de ensaio, o que permite uma visualização da representatividade do retardo quando se aumenta a razão de sobrecarga.

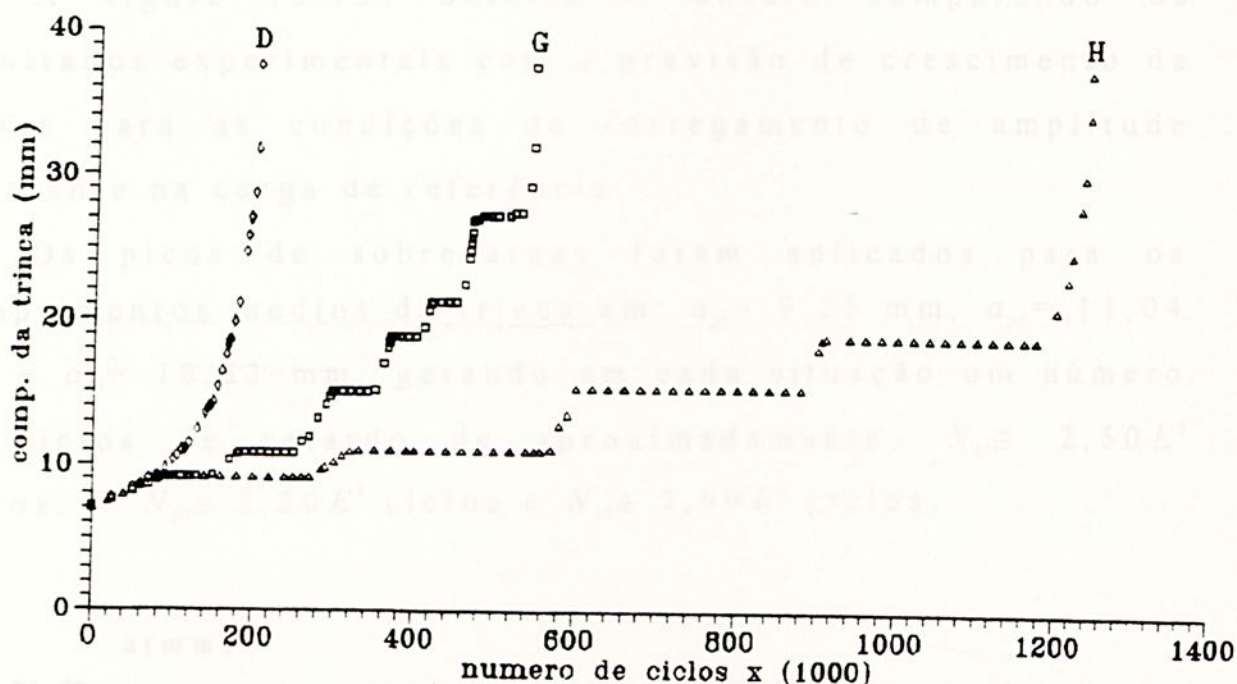


Figura (5.72)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo para 1 pico de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,4$  (D),  $R_{sc} = 1,8$  (G) e  $R_{sc} = 2,0$  (H).

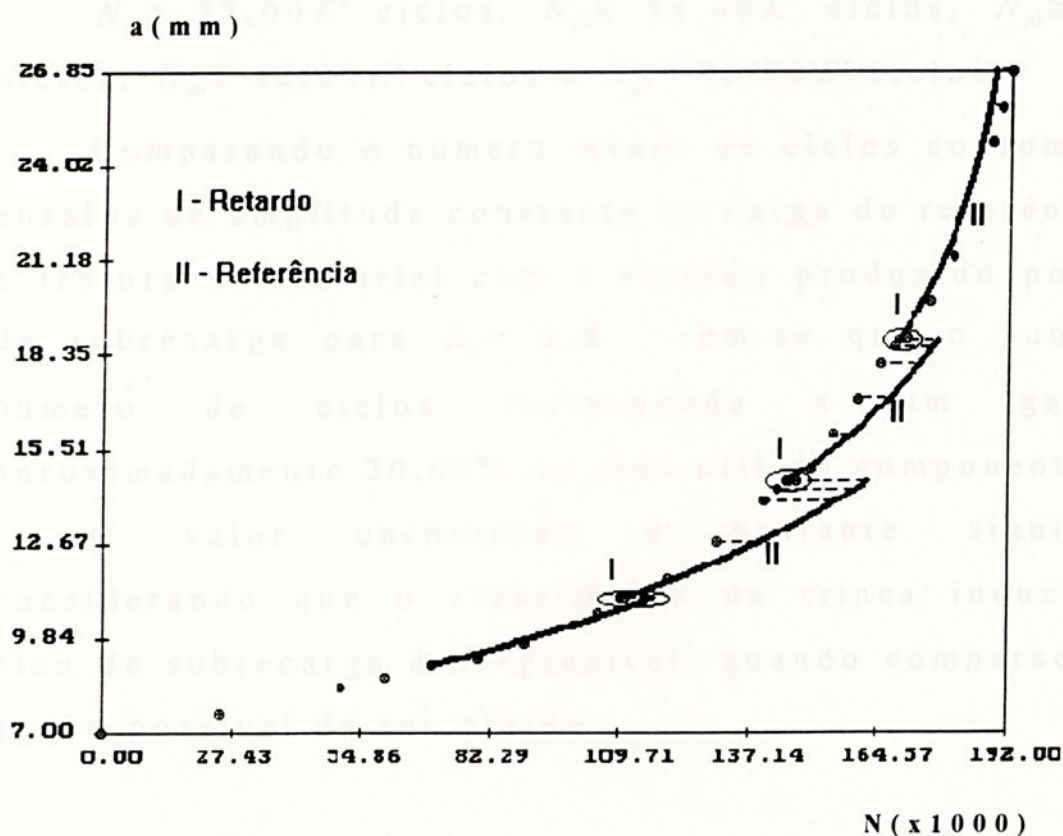
Em uma análise preliminar das curvas apresentadas pode-se observar a existência do efeito do retardo e o aumento da intensidade quando aumentamos a razão de sobrecarga ( $R_{sc}$ ).

Para  $R_{sc} = 1,4$  e 1 pico de sobrecarga, já é possível observar pequenas variações, no perfil da curva logo após a aplicação da sobrecarga; porém, o retardo efetivo produzido é muito pequeno, já que, após um pequeno número de ciclos, a curva retorna a seu comportamento normal na carga de referência.

O efeito do retardo produzido para esta condição de carregamento acaba sendo eliminado pelo crescimento da trinca devido à sobrecarga e pelos desvios característicos dos ensaios de fadiga.

A figura (5.73) detalha o ensaio comparando os resultados experimentais com a previsão de crescimento da trinca para as condições de carregamento de amplitude constante na carga de referência.

Os picos de sobrecargas foram aplicados para os comprimentos médios da trinca em:  $a_{p1} = 9,25 \text{ mm}$ ,  $a_{p2} = 11,04 \text{ mm}$  e  $a_{p3} = 18,83 \text{ mm}$ , gerando em cada situação um número de ciclos de retardo de aproximadamente:  $N_{p1} \cong 2,50 E^3$  ciclos,  $N_{p2} \cong 2,20 E^3$  ciclos e  $N_{p3} \cong 2,00 E^3$  ciclos,



Figura(5.73)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo  $\Rightarrow$  1 pico de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,4$



Para  $R_{sc} = 1,8$  e 1 pico de sobrecarga, o efeito do retardo já é muito significativo, podendo ser observada a parada da trinca para um número de ciclos muito maior que na razão de sobrecarga 1,2.

A figura (5.74) compara os resultados experimentais para  $R_{sc} = 1,8$  e 1 pico de sobrecarga com a previsão de crescimento da trinca para carregamento de amplitude constante na carga de referência.

Os picos de sobrecargas foram aplicados para os comprimentos médios da trinca em:  $a_{p1} = 9,08$  mm,  $a_{p2} = 11,00$  mm,  $a_{p3} = 15,04$  mm,  $a_{p4} = 19,00$  mm e  $a_{p5} = 20,94$  mm, gerando, em cada uma das posições, um retardo na taxa de propagação da trinca que correspondeu a um número médio de ciclos de retardo, conforme segue:

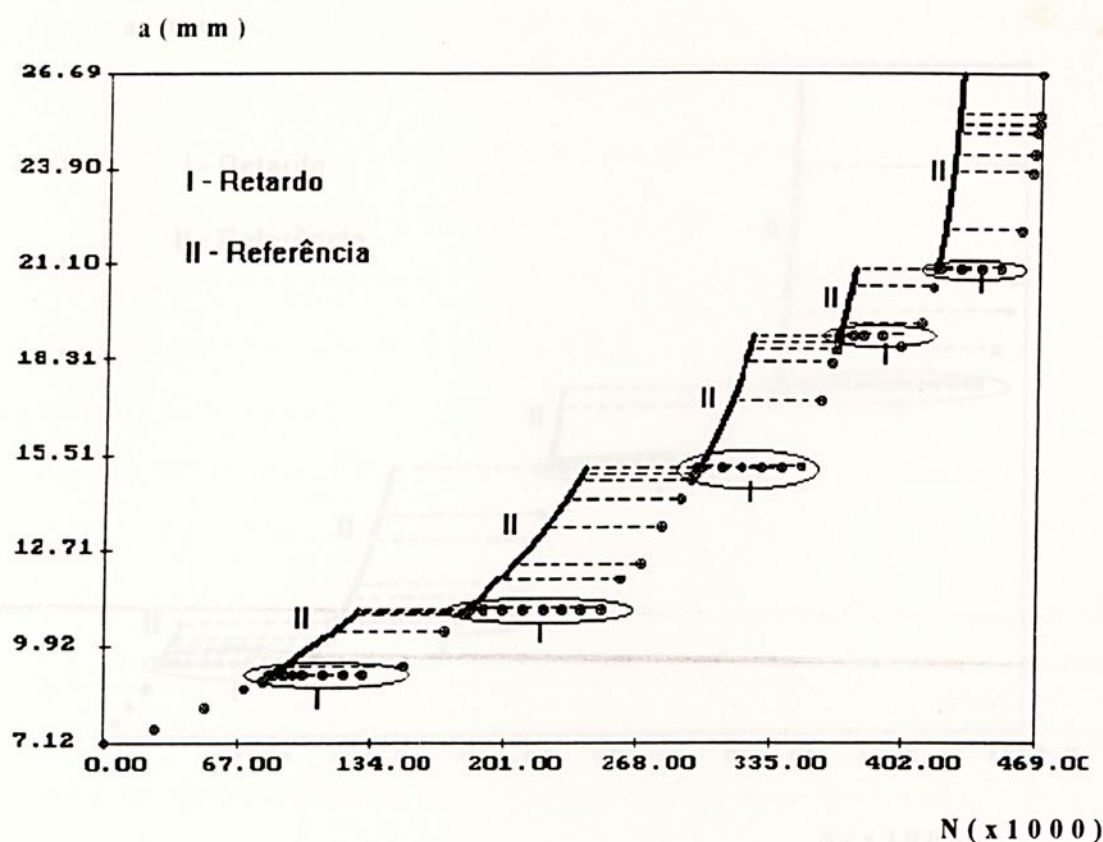
$N_{p1} \cong 57,00 E^3$  ciclos,  $N_{p2} \cong 58,00 E^3$  ciclos,  $N_{p3} \cong 44,00 E^3$  ciclos,  $N_{p4} \cong 42,00 E^3$  ciclos e  $N_{p5} = 40,00 E^3$  ciclos.

Comparando o número médio de ciclos consumidos nos ensaios de amplitude constante na carga de referência, para a fratura do material com o retardo produzido por 1 pico de sobrecarga para  $R_{sc} = 1,8$ , tem-se que o aumento no número de ciclos corresponde a um ganho de aproximadamente 20,00% na vida útil do componente.

O valor encontrado é bastante significativo, considerando que o crescimento da trinca induzido pelo pico de sobrecarga é desprezível, quando comparado com o ganho possível de ser obtido.

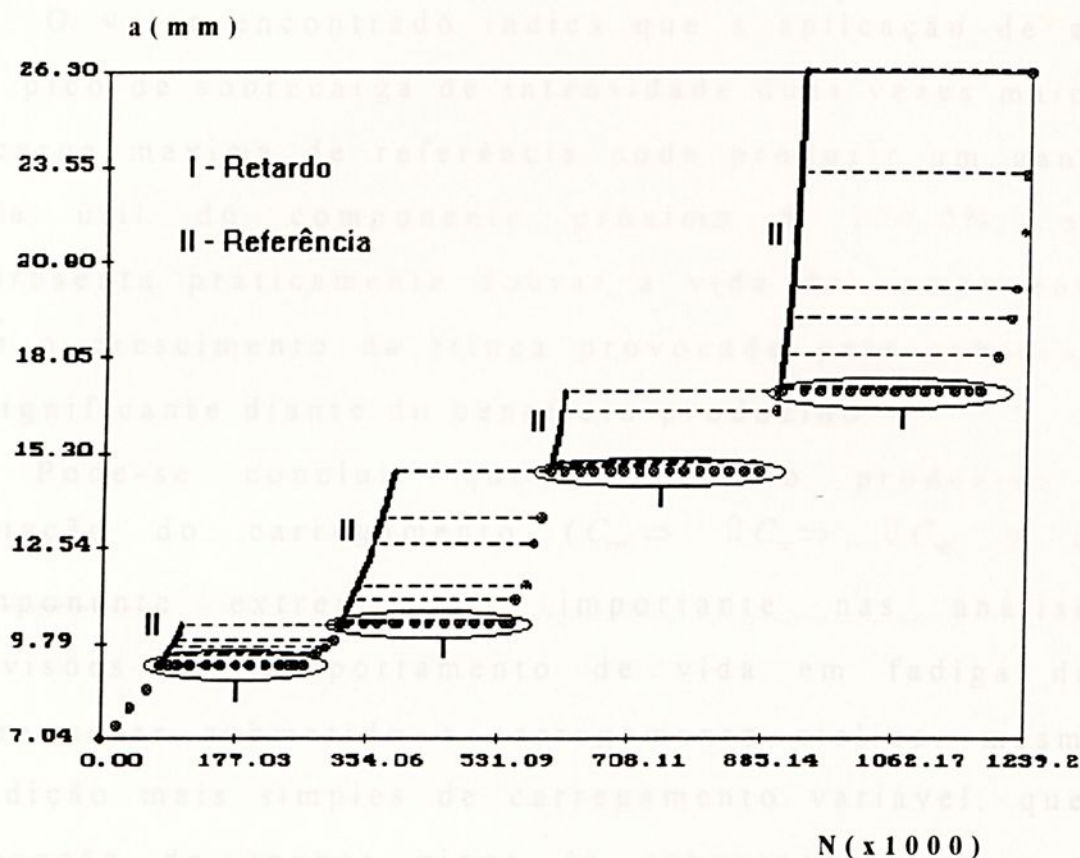






Figura(5.74)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo  $\Rightarrow$  1 pico de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,8$

O mesmo procedimento realizado para  $R_{sc} = 1,8$  foi executado para a  $R_{sc} = 2,0$  e a curva representativa do comportamento do retardo, comparado com as condições de carregamento constante na carga de referência, pode ser observado na figura (5.75).



Figura(5.75)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo  $\Rightarrow$  1 pico de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 2,0$

Para  $R_{sc} = 2,0$  foram aplicados os picos de sobrecarga para os comprimentos médios da trinca em:  $a_{p1} = 9,13$  mm,  $a_{p2} = 10,37$  mm,  $a_{p3} = 14,77$  mm e  $a_{p4} = 17,10$  mm, obtendo-se para cada situação os números aproximados de ciclos de retardo:  $N_{p1} \cong 210,00 E^3$  ciclos,  $N_{p2} \cong 208,00 E^3$  ciclos,  $N_{p3} \cong 205,00 E^3$  ciclos e  $N_{p4} \cong 260,00 E^3$  ciclos.

Comparando o número médio de ciclos consumidos nos ensaios de amplitude constante na carga de referência para a fratura do material, com o aumento do número de ciclos produzido por um pico de sobrecarga para  $R_{sc} = 2,0$  obtém-se um ganho aproximado de vida útil no componente de  $\cong 96,0\%$  por pico de sobrecarga aplicado.



O valor encontrado indica que a aplicação de apenas um pico de sobrecarga de intensidade duas vezes maior que a carga máxima de referência pode produzir um ganho de vida útil do componente próximo a 100,0%, o que representa praticamente dobrar a vida do componente, já que o crescimento da trinca provocado pela sobrecarga é insignificante diante do benefício produzido.

Pode-se concluir que o retardo produzido pela variação do carregamento ( $C_{ref} \Rightarrow \uparrow C_{sc} \Rightarrow \downarrow C_{ref}$ ) é um componente extremamente importante nas análises e previsões de comportamento de vida em fadiga de um componente submetido a carregamento cíclico, mesmo na condição mais simples de carregamento variável, que é a aplicação de apenas picos de sobrecarga, comprovando assim outros estudos realizados sobre o assunto [08,33,35,37,41,63,64,65]

Dentro do segundo programa de ensaios foram realizados ensaios com aplicação de blocos de sobrecarga na condição de saturação cíclica, que representa as condições de carregamento em que se obtém o máximo de retardo para determinada razão de sobrecarga.

A literatura especializada indica a existência de um número mínimo de ciclos de sobrecarga que irão produzir o máximo efeito de retardo para o material em estudo. Qualquer número de ciclos acima da condição de saturação ira produzir um maior crescimento da trinca, sem produzir aumento no número de ciclos de retardo [8,37].





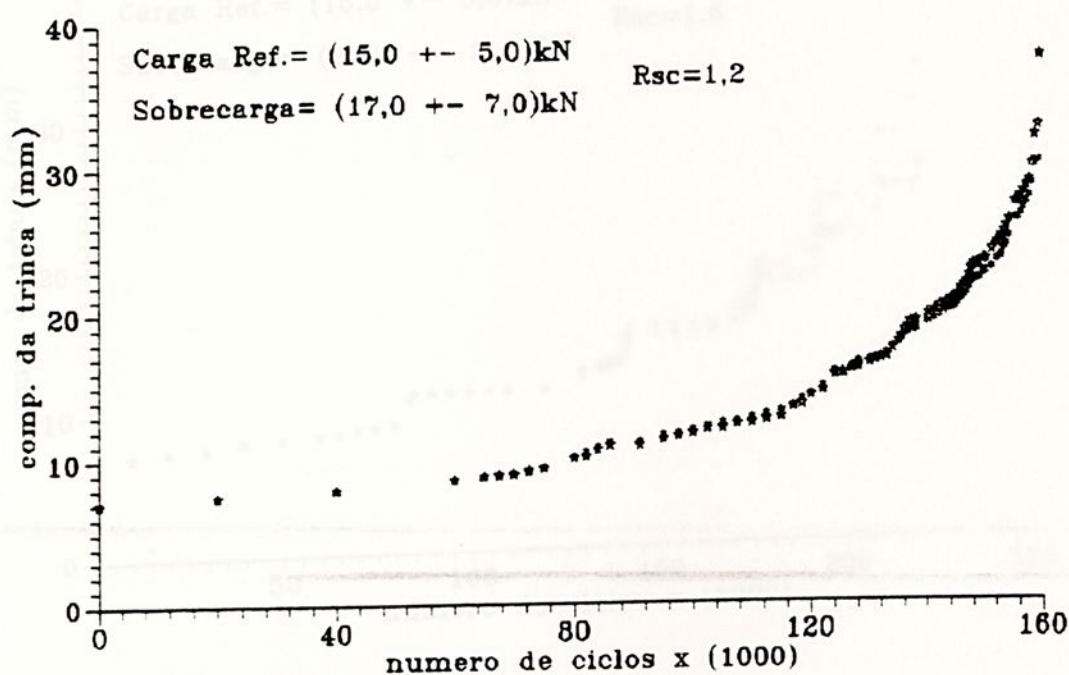
Neste trabalho, foram realizados ensaios com blocos de sobrecarga, não para quantificar o número de ciclos de saturação, mas para quantificar o máximo de retardo possível de se obter quando se trabalha sob a condição de saturação cíclica.

Os ensaios com blocos de sobrecarga na condição de saturação cíclica foram realizados para as razões de sobrecarga ( $R_{sc}$ ) de 1,2 , 1,4 , 1,6 , 1,8 e 2,0. As curvas representativas destes ensaios podem ser observadas nas figuras de (5.76) até (5.80), respectivamente.

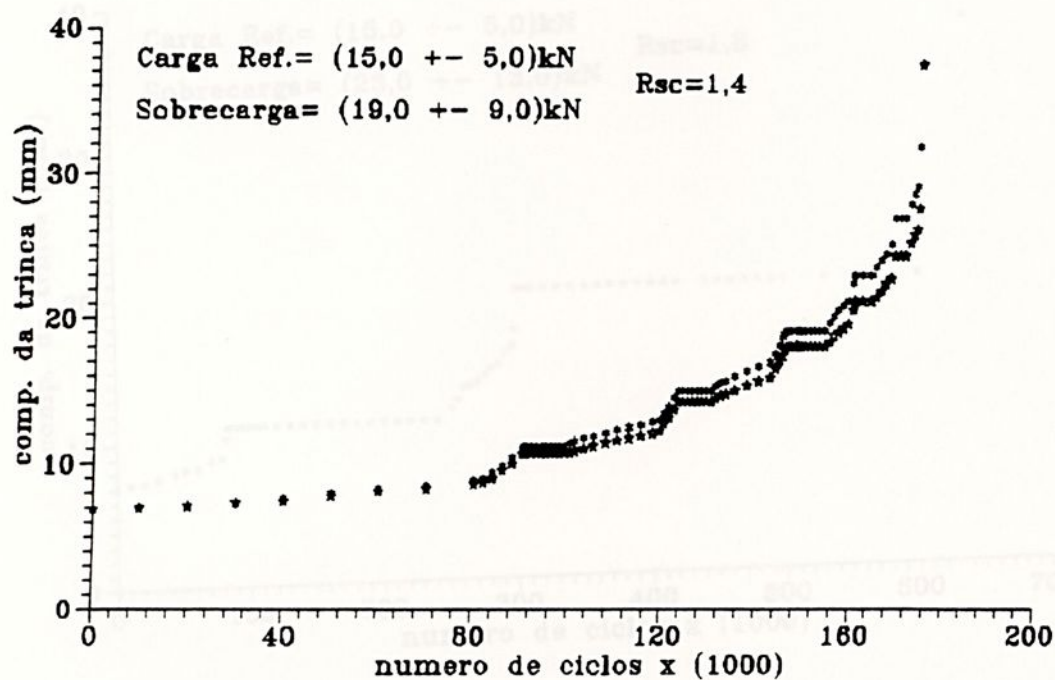
Tabela(5.13)- Efeito do retardo para blocos de sobrecarga

| Carreg. Ref. (kN) |      | Carreg. Sc. (kN) |      | Ciclos Médios | ( % )   | Tipo de    | $R_{sc}$ |
|-------------------|------|------------------|------|---------------|---------|------------|----------|
| máx.              | mín. | máx.             | mín. | Retardo       | da Vida | Sobrecarga |          |
| 20                | 10   | 24               | 10   | 460           | 0,2     | Bloco      | 1,2      |
|                   |      | 28               | 10   | 4275          | 1,8     | Bloco      | 1,4      |
|                   |      | 32               | 10   | 13862         | 6,0     | Bloco      | 1,6      |
|                   |      | 36               | 10   | 220400        | 96,0    | Bloco      | 1,8      |
|                   |      | 40               | 10   | Parada Total  | *****   | Bloco      | 2,0      |

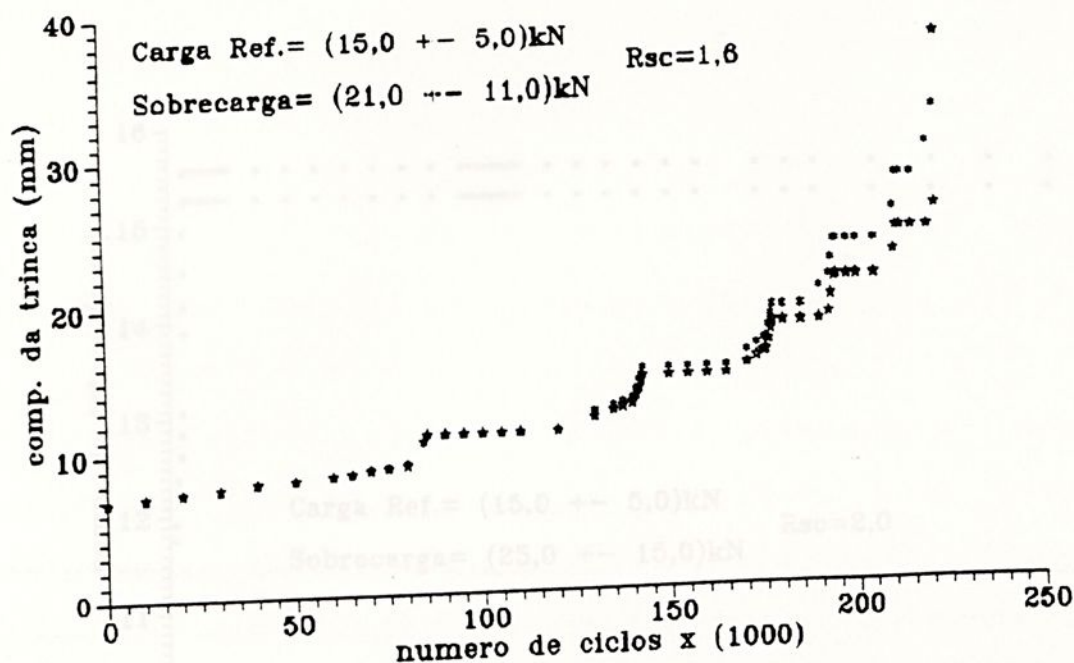




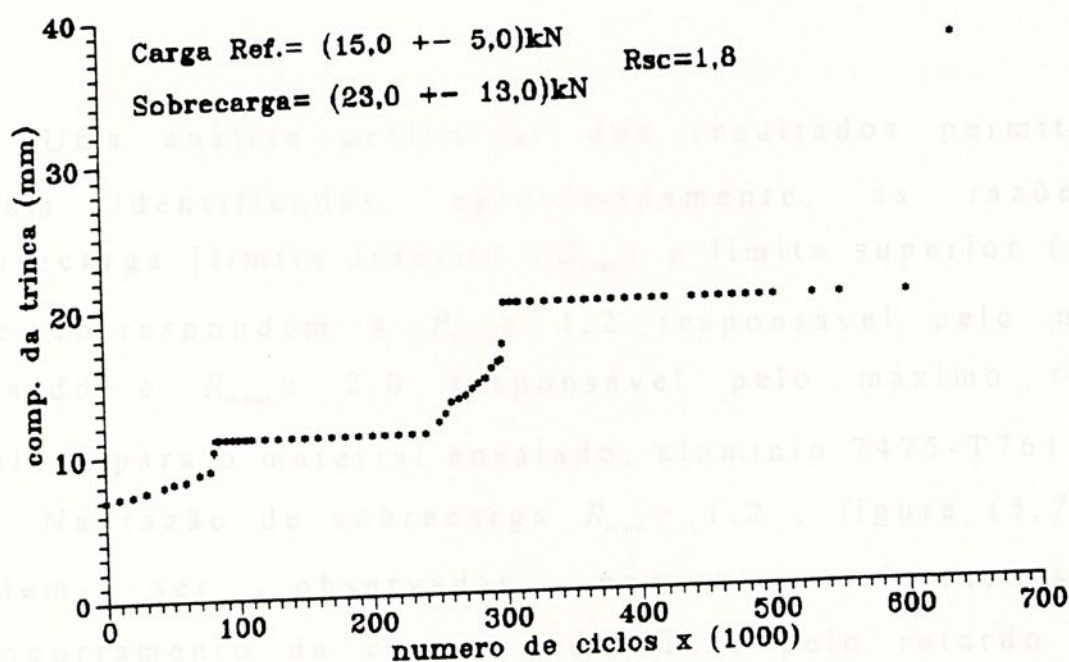
Figura(5.76)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo para blocos de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,2$



Figura(5.77)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo para blocos de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,4$

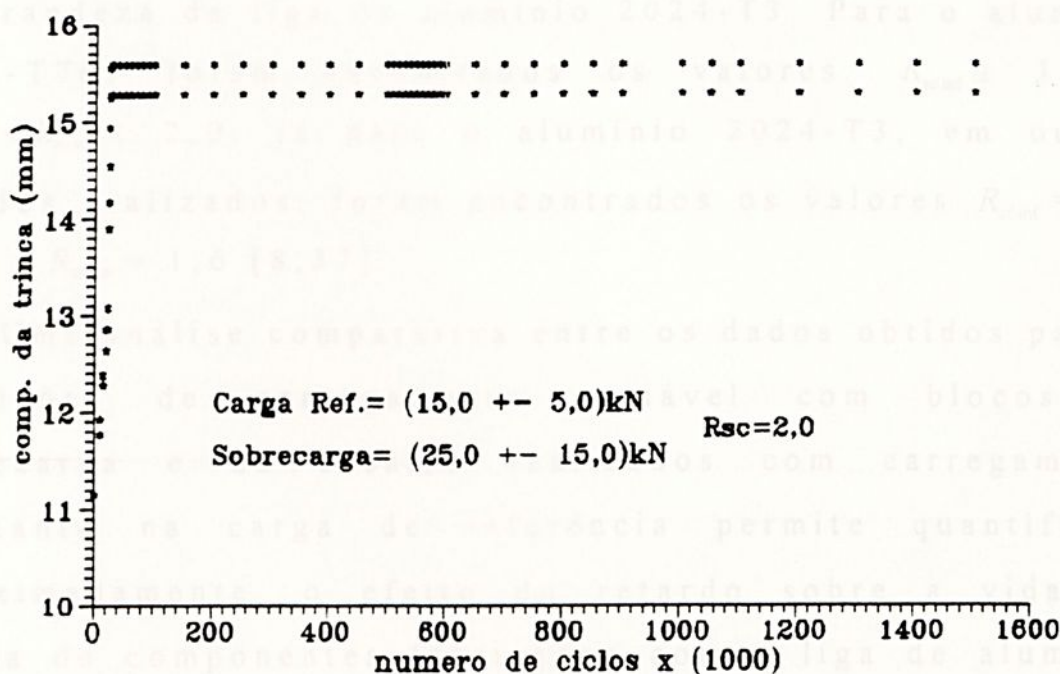


Figura(5.78)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo para blocos de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,6$



Figura(5.79)- Curva  $a \times N \Rightarrow$  retardo para blocos de sobrecarga  $\Rightarrow R_{sc} = 1,8$





Figura(5.80)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  retardo para **blocos de sobrecarga**  $\Rightarrow R_{sc} = 2,0$

Uma análise preliminar dos resultados permite que sejam identificadas, aproximadamente, as razões de sobrecarga [limite inferior ( $R_{sc\ inf.}$ ) e limite superior ( $R_{sc\ sup.}$ )], que correspondem a  $R_{sc\ inf.} \cong 1,2$  responsável pelo mínimo retardo e  $R_{sc\ sup.} \cong 2,0$  responsável pelo máximo retardo obtido, para o material ensaiado, alumínio 7475-T761.

Na razão de sobrecarga  $R_{sc\ inf.} = 1,2$ , figura (5.76), já podem ser observadas pequenas alterações no comportamento da curva, produzidas pelo retardo e, no outro extremo, para  $R_{sc\ sup.} = 2,0$ , figura (5.80), pode ser observada a parada total da trinca, após o retorno ao carregamento de referência.

O comportamento do alumínio 7475-T761 apresenta os limites inferior e superior de sobrecarga da mesma ordem de grandeza da liga de alumínio 2024-T3. Para o alumínio 7475-T761 foram encontrados os valores:  $R_{sc.inf.} \cong 1,2$  e  $1,8 < R_{sc.sup.} \leq 2,0$ ; já para o alumínio 2024-T3, em outros estudos realizados, foram encontrados os valores  $R_{sc.inf.} = 1,2$  e  $R_{sc.sup.} = 1,6$  [8,37].

Uma análise comparativa entre os dados obtidos para a condições de carregamento variável com blocos de sobrecarga e os ensaios realizados com carregamento constante na carga de referência permite quantificar, aproximadamente, o efeito do retardo sobre a vida em fadiga de componentes fabricados com a liga de alumínio 7475-T761, submetidos a carregamento constante.

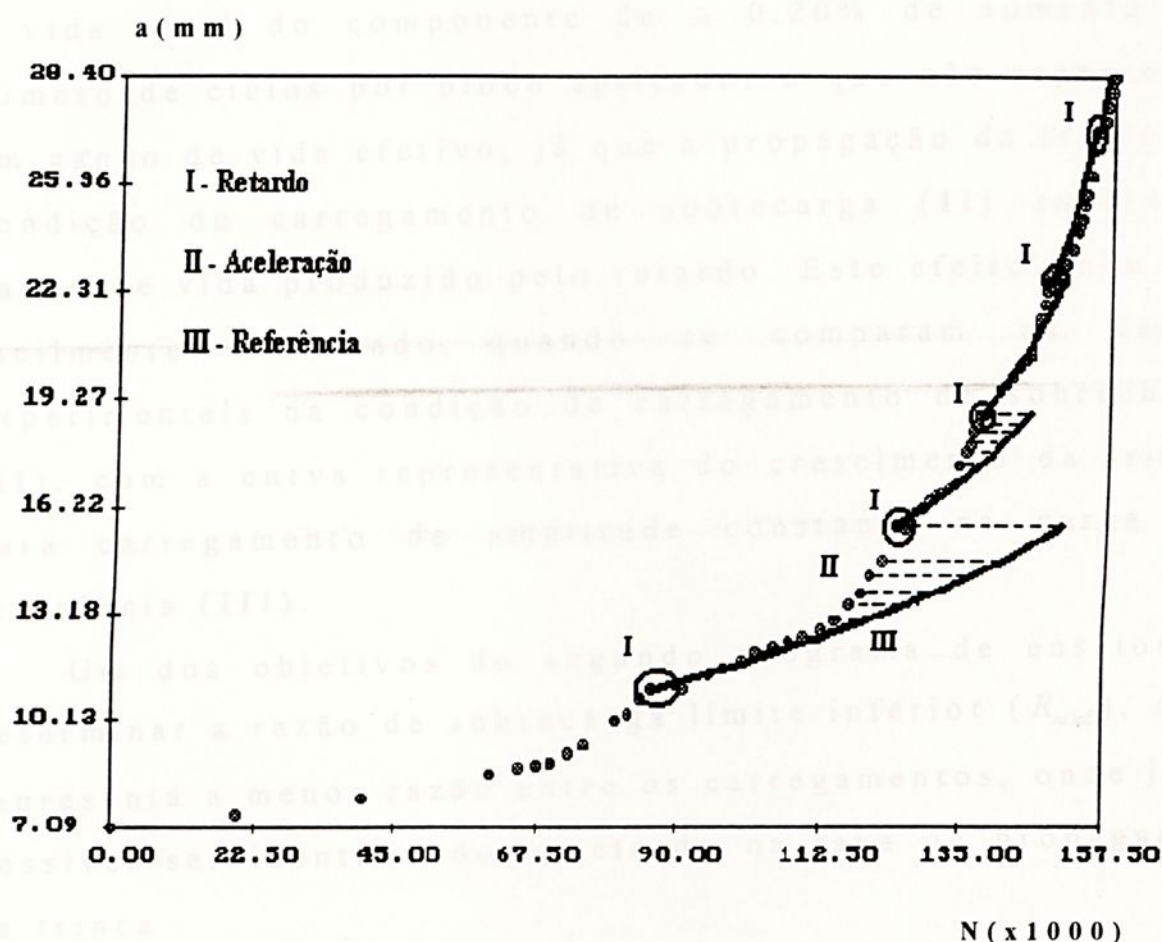
Nas figuras (5.81) até (5.85) tem-se a representação das curvas experimentais para as razões de sobrecarga de 1,2 , 1,4 , 1,6 , 1,8 e 2,0 , mostrando o efeito do retardo produzido quando comparado com o comportamento previsto para o material submetido a carregamento constante.

Este estudo comparativo é iniciado no primeiro ciclo após a aplicação do bloco de sobrecarga, não considerando a aceleração na taxa de propagação da trinca produzida pelo bloco de sobrecarga aplicado anteriormente. O seu objetivo principal é quantificar o retardo ocorrido.





A figura (5.81) apresenta a curva  $a \times N$  para a razão de sobrecarga de 1,2; carregamento de sobrecarga de  $(17,0 \pm 7,0) \text{ kN}$  e carregamento de referência  $(15,0 \pm 5,0) \text{ kN}$ .



Figura(5.81)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_{sc} = 1,2$ .

Para a  $R_{sc} = 1,2$  e blocos de sobrecarga, já é possível identificar variações no perfil da curva logo após a aplicação da sobrecarga.

Nesta razão de sobrecarga foram aplicados os blocos na carga mais alta, que retornaram ao carregamento da referência nos comprimentos médios da trinca em:  $a_{b1} = 11,00 \text{ mm}$ ,  $a_{b2} = 15,68 \text{ mm}$ ,  $a_{b3} = 18,85 \text{ mm}$ ,  $a_{b4} = 22,64 \text{ mm}$  e  $a_{b5} = 26,87 \text{ mm}$ , gerando em cada situação um número médio



de ciclos de retardo de:  $N_{b1} \cong 4,6 E^2$  ciclos,  $N_{b2} \cong 1,6 E^2$  ciclos,  $N_{b3} \cong 3,2 E^2$  ciclos,  $N_{b4} \cong 8,7 E^2$  ciclos e  $N_{b5} \cong 4,9 E^2$  ciclos.

Na figura (5.81) pode-se observar que o retardo, embora já identificado (I), apresenta um efeito médio sobre a vida total do componente de  $\cong 0,20\%$  de aumento no número de ciclos por bloco aplicado, o que não representa um ganho de vida efetivo, já que a propagação da trinca na condição de carregamento de sobrecarga (II) supera o ganho de vida produzido pelo retardo. Este efeito pode ser facilmente observado quando se comparam os dados experimentais na condição de carregamento de sobrecarga (II), com a curva representativa do crescimento da trinca para carregamento de amplitude constante na carga de referência (III).

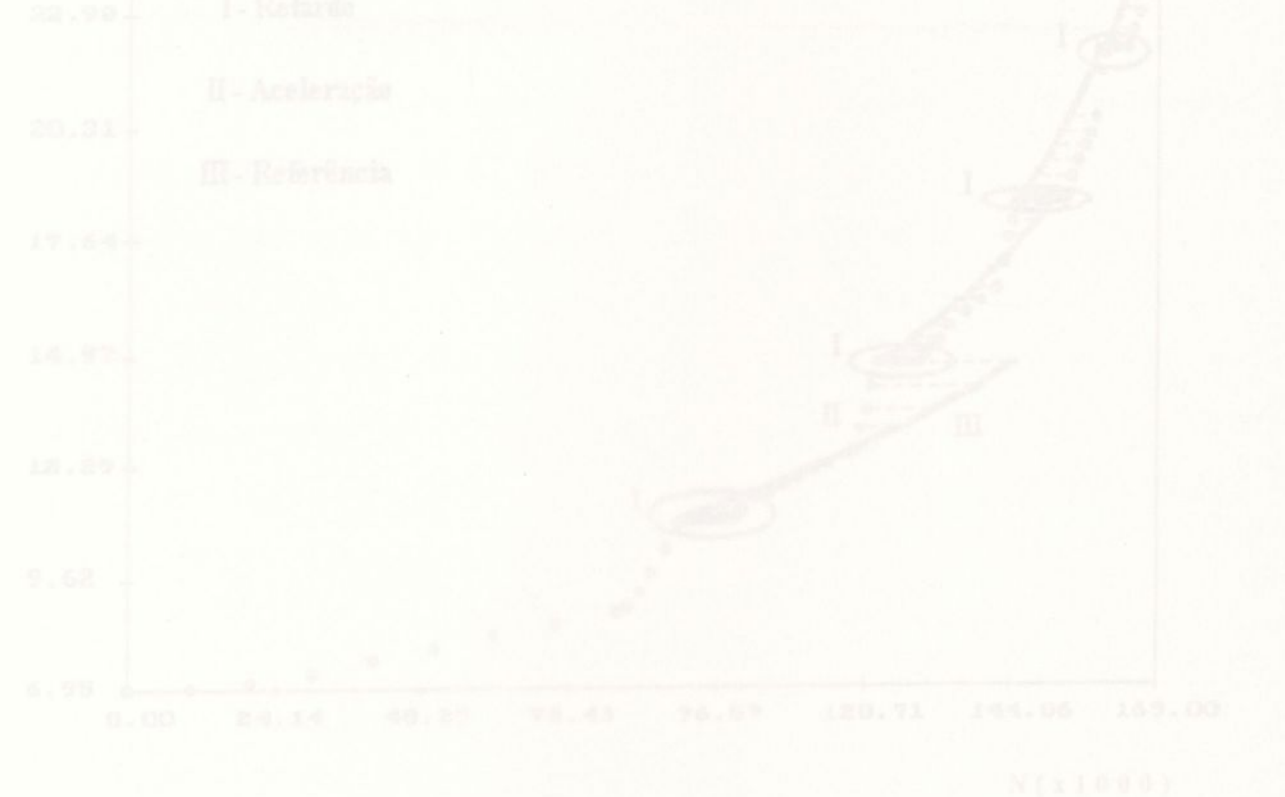
Um dos objetivos do segundo programa de ensaios é determinar a razão de sobrecarga limite inferior ( $R_{sc.inf.}$ ), que representa a menor razão entre os carregamentos, onde já é possível ser identificado o retardo na taxa de propagação da trinca.

Da análise dos resultados pode-se dizer, para a liga de alumínio 7475-T761, que  $R_{sc.inf.} \cong 1,2$ , o que representa um dado importante na elaboração de projetos que procuram estabelecer parâmetros entre causa e efeito produzido por carregamentos de amplitude variável.

Uma análise inicial pode sugerir a impropriedade de se trabalhar com carregamentos de amplitude variável com razão de sobrecarga próxima de 1,2, sendo que o pequeno efeito produzido acaba sendo eliminado pelo aumento na taxa de propagação da trinca gerado na condição de carregamento na carga mais alta. Porém, antes de se



concluir pela viabilidade ou não de se trabalhar nesta condição de carregamento, é importante que se determine o número mínimo de ciclos necessário para que seja atingida a saturação do efeito de retardo e as condições reais do carregamento. Por outro lado, em função dos resultados obtidos, pode-se observar que as diferenças entre as taxas de propagação da trinca, para os dois níveis de carregamento, tendem a ser reduzidas à medida que a trinca se propaga, enquanto que o efeito do retardo não apresenta o mesmo efeito de redução.



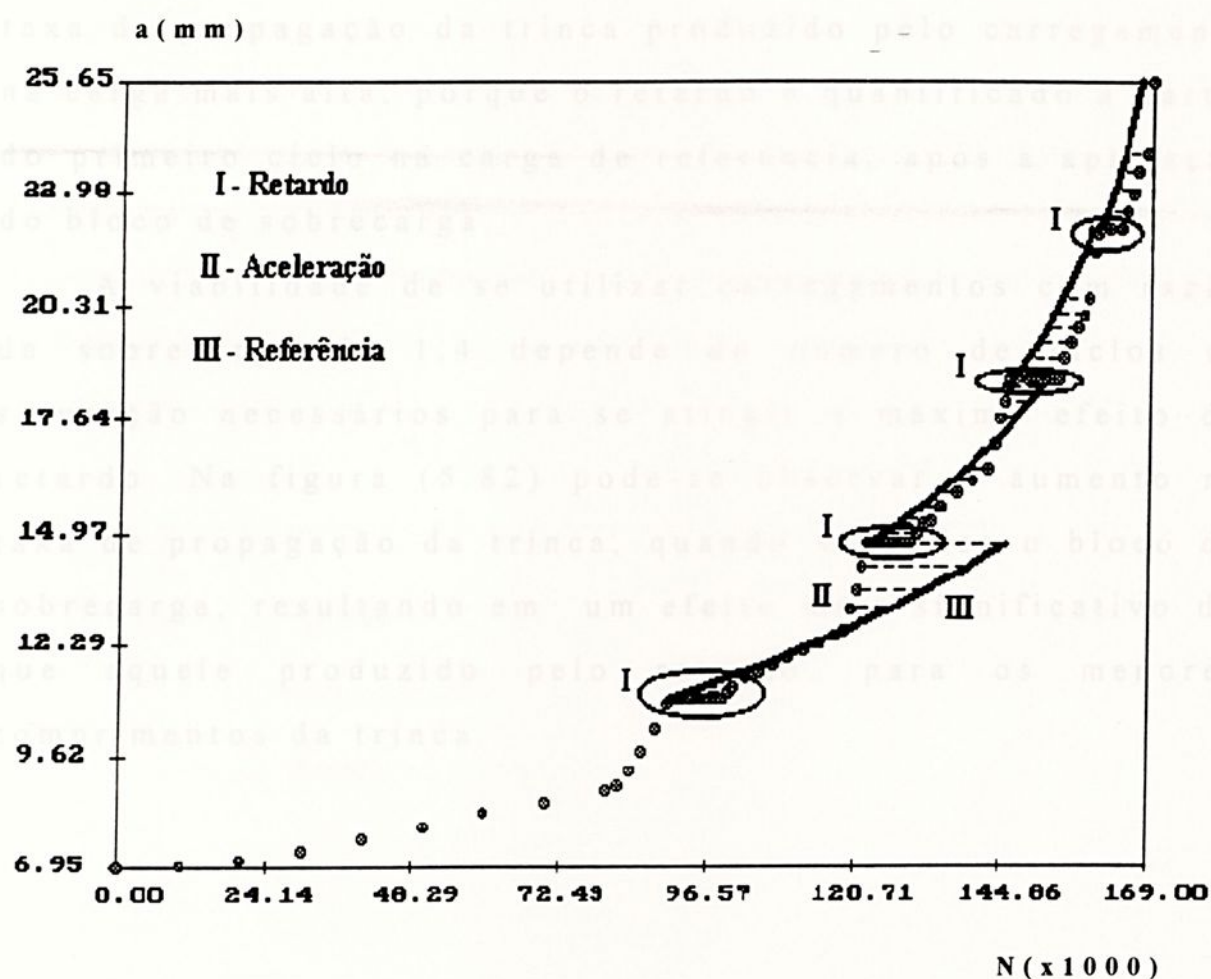
Figura(3.82)- Curvas  $\log N$  vs carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_e = 1.4$ .  
 Nesta razão de sobrecarga foram aplicados os blocos de carga mais alta, que retardaram o carregamento da referência nos comprimentos médios da trinca em  $a_{II} = 11.00\text{mm}$ ,  $a_{III} = 14.70\text{mm}$ ,  $a_{IV} = 18.65\text{mm}$  e  $a_{V} = 22.13\text{mm}$ , gerando, em cada situação, um número médio de ciclos de





A figura (5.82) apresenta a curva  $a \times N$  para a razão de sobrecarga de 1,4 [carregamento de sobrecarga  $(19,0 \pm 9,0)$  kN e carregamento de referência  $(15,0 \pm 5,0)$  kN].

Para a  $R_{sc} = 1,4$  e blocos de sobrecarga verificou-se um efeito de retardo com uma intensidade superior ao efeito apresentado na condição do carregamento anterior ( $R_{sc} = 1,2$ ).



Figura(5.82)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_{sc} = 1,4$ .

Nesta razão de sobrecarga foram aplicados os blocos na carga mais alta, que retornaram ao carregamento da referência nos comprimentos médios da trinca em:  $a_{b1} = 11,00$  mm,  $a_{b2} = 14,70$  mm,  $a_{b3} = 18,65$  mm e  $a_{b4} = 22,13$  mm, gerando, em cada situação, um número médio de ciclos de



retardo de:  $N_{b1} \cong 4,0 E^3$  ciclos,  $N_{b2} \cong 4,3 E^3$  ciclos,  $N_{b3} \cong 5,3 E^3$  ciclos e  $N_{b4} \cong 3,5 E^3$  ciclos.

Quando se compara o efeito médio de retardo produzido por bloco de sobrecarga com o carregamento de amplitude constante na carga de referência, obtém-se um aumento de vida útil do componente de  $\cong 1,8\%$  por bloco de sobrecarga aplicado. Este valor não considera o aumento na taxa de propagação da trinca produzido pelo carregamento na carga mais alta, porque o retardo é quantificado a partir do primeiro ciclo na carga de referência, após a aplicação do bloco de sobrecarga.

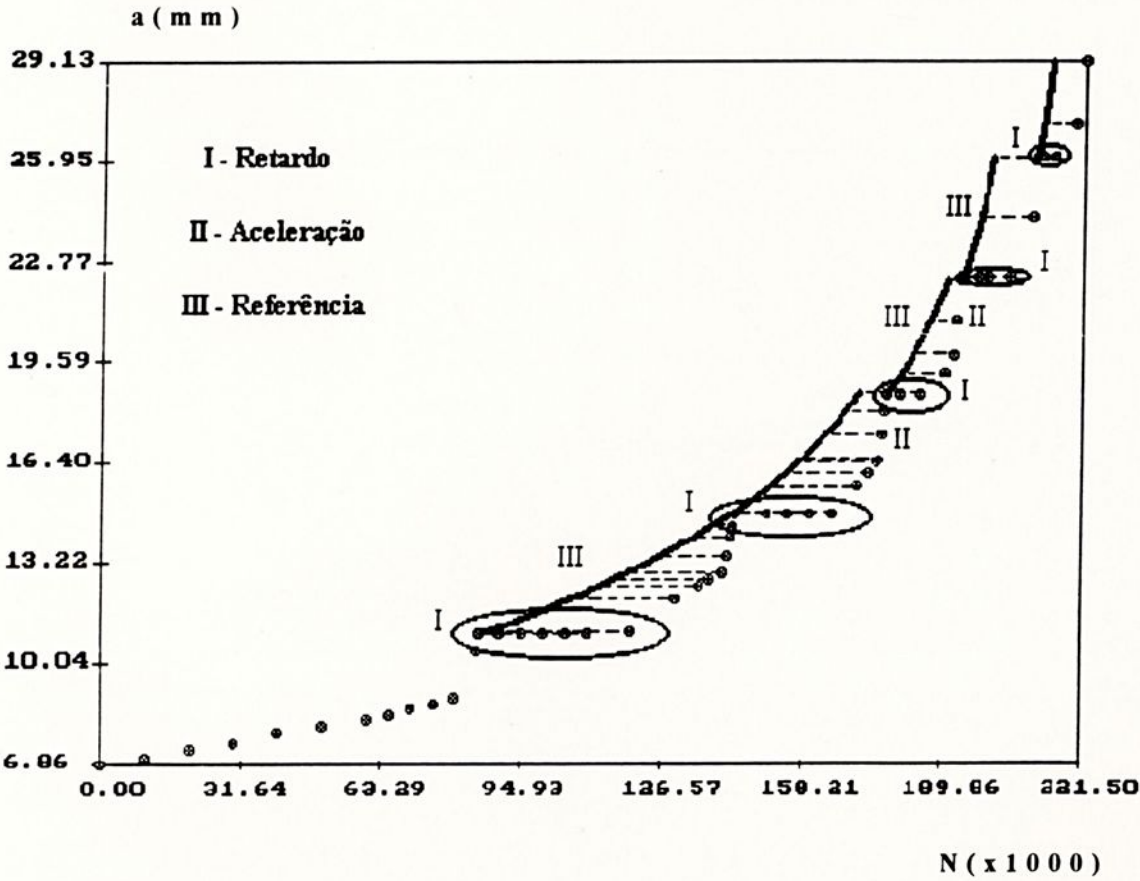
A viabilidade de se utilizar carregamentos com razão de sobrecarga de 1,4 depende do número de ciclos de saturação necessários para se atingir o máximo efeito do retardo. Na figura (5.82) pode-se observar o aumento na taxa de propagação da trinca, quando se aplica o bloco de sobrecarga, resultando em um efeito mais significativo do que aquele produzido pelo retardo, para os menores comprimentos da trinca.



A figura (5.83) apresenta a curva  $a \times N$  para a razão de sobrecarga de 1,6 [carregamento de sobrecarga  $(21,0 \pm 11,0)$  kN e carregamento de referência  $(15,0 \pm 5,0)$  kN].

Para a  $R_{sc} = 1,6$  e blocos de sobrecarga verificou-se um efeito de retardo com uma intensidade superior ao efeito apresentado nas condições dos carregamentos anteriores.

Nesta razão de sobrecarga foram aplicados os blocos na carga mais alta, que retornaram ao carregamento da referência nos comprimentos médios da trinca em:  $a_{b1} = 10,95$  mm,  $a_{b2} = 14,79$  mm,  $a_{b3} = 18,56$  mm,  $a_{b4} = 22,25$  mm e  $a_{b5} = 26,08$  mm, gerando, em cada situação, um número médio de ciclos de retardo de:  $N_{b1} \cong 24,6 E^3$  ciclos,  $N_{b2} \cong 18,5 E^3$  ciclos,  $N_{b3} \cong 9,5 E^3$  ciclos,  $N_{b4} \cong 10,81 E^3$  ciclos e  $N_{b5} \cong 5,9 E^3$  ciclos.



Figura(5.83)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_{sc} = 1,6$ .

Quando se compara o efeito médio do retardo produzido por bloco de sobrecarga, com o carregamento na carga de referência, obtém-se um aumento médio de vida útil do componente de  $\cong 6,0\%$  por bloco aplicado. Este valor não considera o aumento na taxa de propagação da trinca produzido pelo carregamento na carga mais alta; o retardo é quantificado a partir do primeiro ciclo na carga de referência, após a aplicação da sobrecarga. com o número de ciclos de saturação.

A figura (3-84) apresenta o gráfico  $a \times N$  para a razão de sobrecarga de 1,8 [carregamento de sobrecarga:  $(23,0 \pm 3,0)$  kN e carregamento de referência:  $(15,0 \pm 5,0)$  kN].



Figura(3-84)- Curvas  $a \times N$  com carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_2 = 1,8$ .

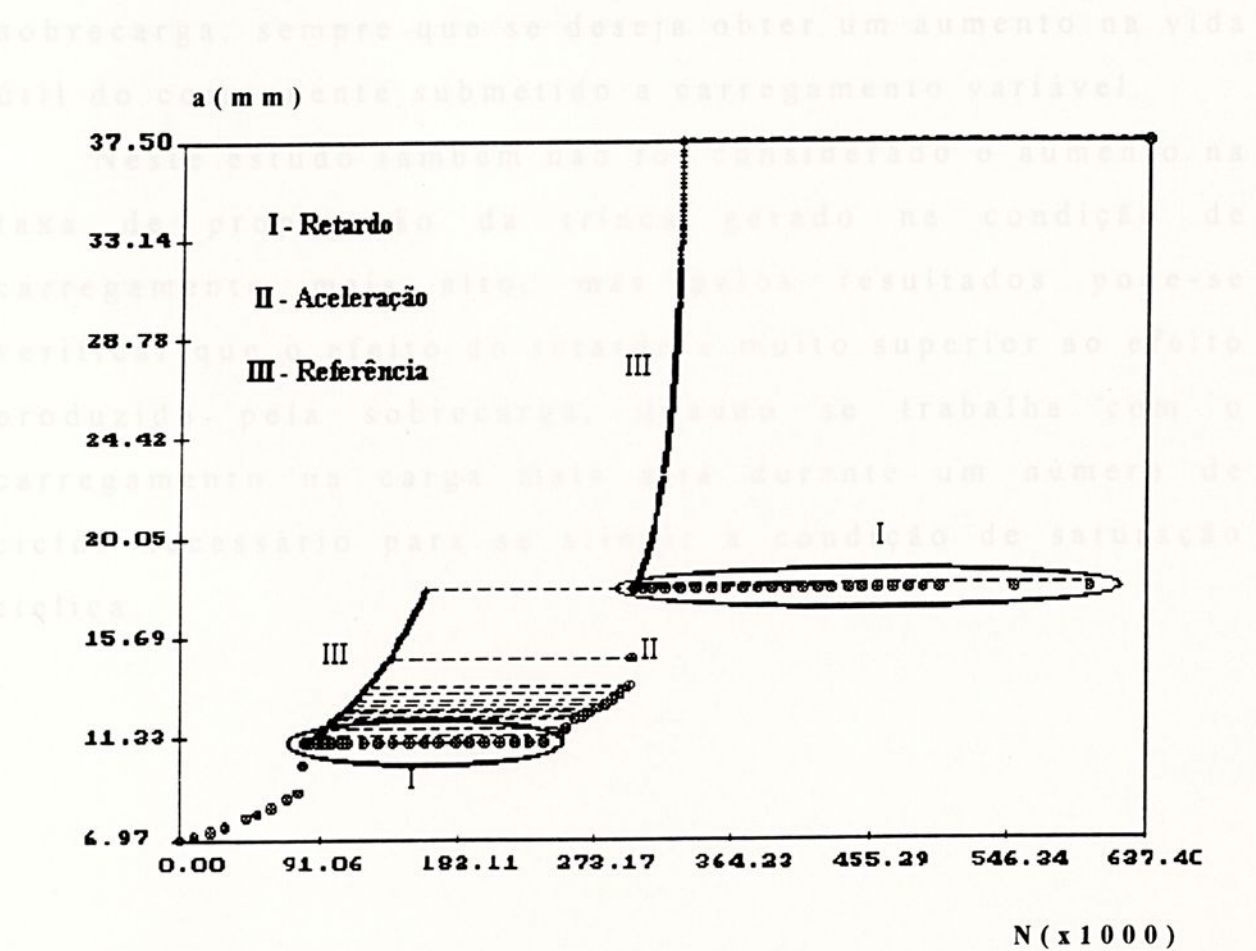




Na figura (5.83) pode ser observado que em nenhum momento do ensaio, a taxa de propagação da trinca na carga mais alta superou o efeito produzido pelo retardo.

Considerando que, em todas as aplicações da sobrecarga tenha sido atingido o número de ciclos de saturação, pode-se concluir que o efeito do retardo para a razão de sobrecarga 1,6 sempre irá produzir um ganho na vida útil do componente, quando se trabalha com o número de ciclos de saturação.

A figura (5.84) apresenta a curva  $a \times N$  para a razão de sobrecarga de 1,8 [carregamento de sobrecarga  $(23,0 \pm 13,0)$  kN e carregamento de referência  $(15,0 \pm 5,0)$  kN].



Figura(5.84)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_{sc} = 1,8$ .

Para a  $R_{sc} = 1,8$  e blocos de sobrecarga, verificou-se um efeito de retardo com uma intensidade superior ao efeito apresentado nas condições do carregamento anterior ( $R_{sc}=1,2$ ,  $R_{sc}=1,4$  e  $R_{sc}=1,6$ ).

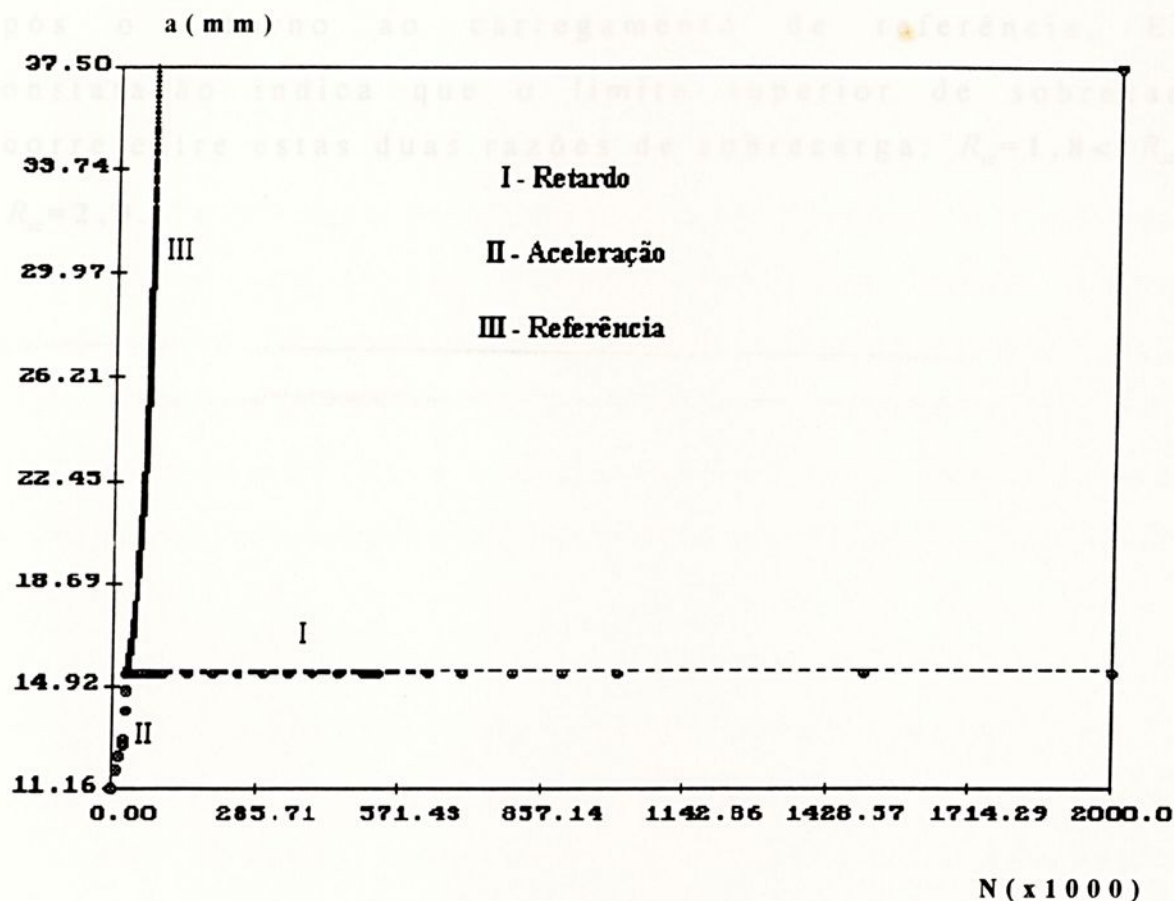
Nesta razão de sobrecarga foram aplicados os blocos na carga mais alta, que retornaram ao carregamento de referência nos comprimentos médios da trinca em:  $a_{b1} = 11,11\text{mm}$  e  $a_{b2} = 17,80\text{mm}$ . Quando se compara o efeito médio do retardo gerado pelo bloco de sobrecarga, com o carregamento na carga de referência, obtém-se um aumento médio na vida útil do componente de  $\cong 96,0\%$  por bloco de sobrecarga aplicado, o que justifica o uso desta razão de sobrecarga, sempre que se deseja obter um aumento na vida útil do componente submetido a carregamento variável.

Neste estudo também não foi considerado o aumento na taxa de propagação da trinca gerado na condição de carregamento mais alto, mas pelos resultados pode-se verificar que o efeito do retardo é muito superior ao efeito produzido pela sobrecarga, quando se trabalha com o carregamento na carga mais alta durante um número de ciclos necessário para se atingir a condição de saturação cíclica.





A figura (5.85) apresenta a curva  $a \times N$  para a razão de sobrecarga de 2,0 [carregamento de sobrecarga  $(25,0 \pm 15,0)$  kN e carregamento de referência  $(15,0 \pm 5,0)$  kN].



Figura(5.85)- Curvas  $a \times N \Rightarrow$  carregamento de amplitude variável com blocos de sobrecarga para  $R_{sc} = 2,0$ .

Para este nível de carregamento foi observada a parada total no crescimento da trinca.

Na  $R_{sc} = 2,0$  foi aplicado um bloco de sobrecarga na condição de saturação cíclica até o comprimento médio da trinca de 15,43mm, quando houve o retorno ao carregamento de referência.

Após a aplicação da sobrecarga, a trinca não mais se propagou, determinando assim o parâmetro de projeto limite superior de sobrecarga ( $R_{sc, sup}$ ).



Analisando os resultados obtidos pode-se verificar que para  $R_{sc} = 1,8$ , a trinca voltou a se propagar. Para o carregamento de referência, após  $\cong 230 E^3$  ciclos de retardo e para  $R_{sc} = 2,0$ , a trinca não mais voltou a se propagar após o retorno ao carregamento de referência. Esta constatação indica que o limite superior de sobrecarga ocorre entre estas duas razões de sobrecarga;  $R_{sc} = 1,8 < R_{sc, sup.} \leq R_{sc} = 2,0$ .



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

1)- Para os carregamentos de amplitude constante observou-se que a taxa de propagação da trinca aumenta com a razão de carregamento. Considerando-se ensaios de propagação da trinca nas mesmas condições para as frequências de 90 Hz e 180 Hz, observou-se que o aumento da frequência produziu um aumento na taxa de propagação da trinca.

2)- A equação de Paris representou bem o comportamento experimental em ambas as frequências estudadas. Quando se comparam as mesmas condições de carregamento para 90 Hz e 180 Hz verifica-se um maior valor de  $C$  para a maior frequência.

3)- Nos ensaios realizados, os valores individuais de  $C$  ( $C_{ind.}$ ) variaram entre  $2,83 E^{-9}$  e  $3,00 E^{-10}$  e, os de  $n$  ( $n_{ind.}$ ) entre 2,14 e 1,56.

4)- De maneira geral, observou-se que o aumento no valor de  $R$  resultou em um aumento no valor de  $C$  ( $C_{ind.}$  e  $C_{genérico}$ ).



5)- Considerando-se  $n_{medio}$ , o aumento na frequência do carregamento resulta em um aumento de  $C$  ( $C_{genenco}$ ) e conseqüentemente, na taxa de propagação da trinca. O máximo valor de  $C_{genenco}$  foi obtido para o carregamento  $(51,5 \pm 3,5)$  kN na frequência de 180 Hz, e o mínimo, para o carregamento  $(6,5 \pm 3,5)$  kN na frequência de 90 Hz.

6)- A análise dos dados experimentais com as curvas obtidas pela equação de Paris apresentam menores desvios quando os parâmetros  $C$  e  $n$  são ajustados individualmente. Para estas condições de carregamento o máximo desvio obtido foi de 2,1%. Para as diversas condições de ensaios, fixando-se o valor de  $n_{medio}$ , os resultados apresentaram desvios aceitáveis, sendo que, entre todas as simulações feitas, o máximo desvio obtido foi de 4,6%. Estes resultados indicam a equação de Paris como uma forma de modelagem eficiente e representativa das condições de ensaio para carregamentos de amplitude constante.

7)- Observou-se a existência de retardo na propagação da trinca no retorno da sobrecarga para a carga de referência em carregamentos de amplitude variável.

8)- Nos estudos com picos de sobrecarga verificou-se o início do retardo para a razão de sobrecarga ( $R_{sc} = \left( \frac{\sigma_{max.sc}}{\sigma_{max.ref}} \right)$ ) de 1,4. Para valores menores da  $R_{sc}$  não se observou retardo no crescimento da trinca na sequência descendente de carregamento. Um aumento da  $R_{sc}$  resulta em um aumento do número de ciclos de retardo.





9)- Em carregamentos de blocos de sobrecarga, o início do retardo ocorreu para  $R_{sc} \cong 1,2$  e a parada total no crescimento da trinca ocorreu para  $R_{sc} \cong 2,0$ .

10)- Para as menores razões de sobrecarga é identificado um menor efeito do retardo. Seu efeito sobre a vida útil do componente é minimizado ou anulado devido ao aumento, observado na taxa de propagação da trinca, produzido pelo carregamento na carga mais alta.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1- Estudar a variação na taxa de propagação da trinca para diferentes frequências de carregamento, procurando estabelecer uma relação entre os dois parâmetros que permita a prever o comportamento do componente sob diversas situações práticas.

2- Estudar o número de ciclos de saturação, para a aplicação de blocos de sobrecarga, com o objetivo de identificar sob que condições o efeito do retardo representa um ganho real na vida do componente.

3- Estudar o efeito de subcargas na redução do efeito do retardo.

4- Realizar modelagem teórica para as condições de carregamento de amplitude variável para picos e blocos de sobrecarga.

5- Analisar o efeito da microestrutura sobre a propagação da trinca.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] BROEK, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Nordhoff International Publishing, Leyden, 1986.
- [02] WALTER, S., *Learning from Accidental Experiments*, Mechanical Engineering, pp.-(44-49), 1987.
- [03] RITCHIE, R. O., *The Influence of Fracture Mechanisms on Fatigue Crack Propagation, The Practical Implications of Fracture Mechanisms*, The Institution of Metallurgists, Spring Meeting, pp.-(73-87), 1973.
- [04] MADAYAG, A. F., *Metal Fatigue: Theory and Design*, John Wiley & Sons, 1969.
- [05] PEEL, C. J., *Aluminum Alloys for Airframes-Limitations and Developments*, Materials Science and Technology, 1986, pp.-(1169-1175).
- [06] SANDERS JR., T. H., AND STALEY, J. T., *Review of Fatigue and Fracture Research on High Strength Aluminum Alloys*, Aluminum Company of America (ALCOA), 1985.
- [07] BEST, K. F., *High Strength Materials for Aircraft Landing Gear*, Aircraft Engineering, pp.-(14-24), 1986.
- [08] VOORWALD, H. J. C., *Estudo da Influência dos Efeitos de Interação Presentes em Carregamento de Amplitude Variável, no Dano Total Durante o Período de Propagação da Trinca por Fadiga*, Tese de Livre Docência - UNESP, 1990.





- [09] MEYERS, M. A. E CHAWLA, K. K., *Principios de Metalurgia Mecânica*, Editora Edgard Blücher Ltda, 1982, pg- (127-169) e (422-453).
- [10] ROLFE, S. T. AND BARSON, J. M., *Fracture and Fatigue Control in Structures - Applications of Fracture Mechanics*, Prentice- Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1977.
- [11] ATLURI, S. N. AND KOBAYASHI, A. S., *Elastic-Plastic Fracture, Computational Methods in the Mechanics and Mathematical Methods*, Elsevier Science Publishers B.V., pp.-(55-57), 1986.
- [12] MILLER, M. S. AND GALLAGHER, J. P., *An Analysis of Several Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis*, American Society for Testing and Materials, ASTM-STP738, pp.-(205-251), 1981.
- [13] IRVING, P. E. AND MCCARTNEY, L. N., *Prediction of Fatigue Crack Growth Rates: Theory, Mechanisms and Experimental Results*, Fatigue 1977- Conference Hold at the University of Cambridge, 1977.
- [14] CIESLAK, S. J. AND MEHR, P. L., *ALCOA 7475 Sheet and Plate*, Aluminum Company of America, Application Engineering Division, Alcoa Center, Pennsylvania 15069, December 1985.
- [15] SHINOZAKI, M., et alii, *Development of High Strength Steel Sheets for Wheel Rim Use*, SAE Technical Paper Series- 830279, pp.(83-91), 1983.
- [16] GRUBISIC, V., *Nutzfahrzeugraeder Aus Aluminium, Eigenschaften und Bemessungskriterien*, Internationalen Symposiums der Aluminium, p.-(195-202), 1988.



- [17] FINE, M. E., *Fatigue Resistance of Metals*, Metallurgical Transactions, Vol.11A, The Metallurgical Society of AIME, p.-(365-379), 1980.
- [18] DIETER, G. D., *Metalurgia Mecânica*, Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro, p.-(344-384) e (419-450), 1981.
- [19] WOOD, W. A., *Some Basic Studies of Fatigue em Metals, em Fracture*, John Wiley & Sons Inc. New York, 1959.
- [20] GOUGH, H. J., *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, vol.33, p.-(3-114), 1933.
- [21] FORSYTH, P. J. AND STUBBINGTON C. A., *J. Inst. Met.*, Vol.83, p.-395, 1956.
- [22] WOOD, W. A., *American Society for Testing and Materials*, ASTM-STP237, 1958.
- [23] SCHIJVE, J., *Four Lectures on Fatigue Crack Growth*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, p.-(167-221), 1979.
- [24] LAIRD, C., *Fatigue Crack Propagation*, American Society for Testing and Materials, ASTM- STP415, p.(131-168), 1967.
- [25] MC MILLAN, J. C. AND PELLOUX, R. M. N., *Fatigue Crack Propagation Under Program and Random Loads*, *Fatigue Crack Propagation*, ASTM-STP415, American Society For Testing Materials, p.-505, 1967.
- [26] GRIFFITH, A. A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philosophical Transactions of the Royal Society London, 221A, p.(163-198), 1920.





- [27] EDWARDS, H. L. AND WANHILL, R. J. H., *Fracture Mechanics*, Co-Publication of Edward Arnold and Delftse Vitgevers Maats Chappij, 304 p., 1986.
- [28] IRWIN, G. R., *Analysis of Stress and Strain Near the End of a Crack Transgressing a Plate*, Journal of Applied Mechanics, p.-(361-364), 1957.
- [29] WESTERGAARD, H. M., *Bearing Pressures and Cracks*, Journal Applied Mechanics, p.-(49-53), 1939.
- [30] BAPTISTA, C. A. R. P. *Estudo da Propagação de Trinca por Fadiga em um Aço de Baixo Carbono Submetido a Tratamento Térmico Intercrítico*, Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, 1993.
- [31] KNOTT, J. F., *Fundamentals of Fracture Mechanics*, Butterworths, 1973.
- [32] SULIVAN, A. M., STOP, T. AND FREED, C. N., *Influence of Sheet Thickness upon the Fracture Resistance of Structural Aluminum Alloys*, American Society for Testing and Materials , ASTM-STP356, p.-(323-333), 1973.
- [33] TORRES, M. A. S., *Análise e Modelamento do Retardo na Propagação de Trinca por Fadiga em Carregamento de Amplitude Variável para a Liga de Alumínio 2024T3*, Tese de Mestrado, UNESP, 1992.





- [34] BASTIAN, F.L., CAMINHA JR, H.M., MORAES M.M., *Mecânica da Fratura*, Instituto Brasileiro de Qualidade Nuclear - IBQN- Rio de Janeiro, 1987.
- [35] PINTO JR, C.C.E., *Análise do Retardo da Propagação da Trinca por Fadiga em uma Chapa de Alumínio Submetida a Carregamento de Amplitude Variável*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 1989.
- [36] NELSON, D. V., *Review of Fatigue Crack Growth Prediction Methods*, Experimental Mechanics, 1977.
- [37] VOORWALD, H. J. C., *Propagação da Trinca por Fadiga em Chapas Finas de Liga de Alumínio de Alta Resistência sob Carregamento de Amplitude Variável*, Tese de Doutorado, UNICAMP, 1988.
- [38] HOEPPNER, D. W. AND KRUPP, W. E., *Prediction of Component Life by Application of Fatigue Crack Growth Knowledge*, Engineering Fractures Mechanics, p.-(6-47), 1974.
- [39] PARIS, P. AND ERDOGAN, F., *A Critical Analysis of Crack Propagation Laws*, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, série D, vol. 85, p.-(528-534), 1963.
- [40] LIU, H. M., *A Review of Fatigue Crack Growth Analysis Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 16, p.-(91-108), 1991.
- [41] GODEFROID, L. B., *Propagação de Trinca por Fadiga sob Carregamento com Amplitude Constante e Variável em Ligas de Alumínio para a Indústria Aeronáutica*, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, 1993.



- [42] FORMAN, R. G., KEARNEY, V. E. AND ENGLE, R. M., *Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures*, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME 1967, p.- (459-464), 1967.
- [43] ELBER, W., *The Significance of Fatigue Crack Closure Damage Tolerance in Aircraft Structures*, American Society for Testing and Materials, ASTM-STP486, p.-(230-242), 1971.
- [44] NELSON, D. V. AND FUCHS, H. O., *Prediction of Fatigue Crack Growth Under Irregular Loading*, Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, American Society for Testing and Materials, ASTM-STP595, 1976.
- [45] HUDSON, C. M. AND HARDRATH, H. F., *Effects of Chugging Stress Amplitude on the Rate of Fatigue - Propagation in Two Aluminum Alloys*, National Aeronautics and Space Administration, Technical Note D-960.
- [46] BERNARD, P. J., LINDLEY, T. C. AND RICHARDS, C. E., *Mechanics of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation*, Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads, American Society for Testing and Materials, ASTM-STP595, p-(78-97), 1976.
- [47] VON EUW, E. F. J., HERTZBERG, R. W. AND ROBERTS, R., *Delay Effects in Fatigue Crack Propagation*, Analysis and Growth of Cracks, Proceedings of the 1971 National Symposium on





- Fracture Mechanics, American Society for Testing and Materials , ASTM-STP513, p-(230-259), 1972.
- [48] SHIJVE, J. *Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable Amplitude Loading*, American Society for Testing and Materials , ASTM-STP596, p-(3-23), 1976.
- [49] JACOBY, C. 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, American Society for Testing and Materials , ASTM-STP595, p-(172-183), 1976.
- [50] MATTEWS, 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, pp-224, 1971.
- [51] VOORWALD, H. J. C. AND TORRES, M. A. S., *Negative Overload Effects in Fatigue Crack Growth*, Joint FEG/ICF International Conference on Fracture of Engineering Materials and Structures, Singapore, p-(591-596), 1991.
- [52] WHELLER, O.E., *Spectrum Loading and Crack Growth*, Journal of Basic Engineering, vol. 94, 1972.
- [53] WILLENBORG, J., ENGLE, R. M. AND WOOD, H. A., *A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept*, Technical Memorandum 71-1-FBR, jan. , 1971.





- [54] 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*, American Society for Testing and Materials, ASTM-STP748, p.-(41-52), 1981.
- [55] GROSS, B., SRAWLEY, J.E., AND BROWN JR., W.F., *Stress Intensity Factors for a Single Edge-Notch Tension Specimen by Boundary Collocation of a Stress Function*, NASA TND-2395, 1964.
- [56] KOBAYASHI, A. S., *Numerical Analysis in Fracture Mechanics*, Proceedings of the International Conference on Application of Fracture Mechanics, The Hague, p.-(3-26), 1984.
- [57] ABOUTARABI, A. A. AND COWLING, M. J., *Determination of Stress Intensity Factors for Surface Cracks Using Fatigue Crack Growth Data*, International Journal of Fracture 31, pp.-(67-79), 1986.
- [58] ALI ABADI, M.H., ROOKE, D.P. AND CARTWRIGHT, D.J., *An Improved Boundary Element Formulation for Calculating Stress Intensity Factors: Application to Aerospace Structures*, Journal of Strain Analysis, vol. 22, n° 04, p.-(203-207), 1987.
- [59] NEWMAN JR., J.C. AND RAJU, I.S., *Stress Intensity Factor Equations for Crack in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads*, Computational Methods, Elsevier Science Publishers B.V., p.-(311-334), 1986.



- [60] *American Society For Testing Materials*, ASTM- E647-88a - Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, pp-(648-667).
- [61] MESSIAS, J.P., *Fadiga no Aço ABNT 1010AA. na Condição Bifásica*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, UNESP, agosto 1995.
- [62] PASTOUKHOV, V.A.E., BAPTISTA, C. A. R., *Análise da Resistência à propagação subcrítica de trincas sob carregamento cíclico*, trabalho apresentado no I Seminário de Mecânica da Fratura, ABM, anais, junho 1995, MG, p(227-236).
- [63] CAMARGO, J.A.M., VOORWALD, H.J.C., BAPTISTA C. A. R. P., TORRES, M. A. S. E BARBOZA M. J. R., *Estudo da Taxa de Propagação de Trincas por Fadiga, sobre uma Liga de Alumínio de Alta Resistência (7475-T761) Usado na Indústria Aeronáutica*, 10º CBECIMAT- UNICAMP, p.-(586-589), 1992.
- [64] PASTOUKHOV, V. A. E VOORWALD, H. J. C., *Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural*, Editora UNESP, 1995, p.(192)
- [65] VOORWALD, H. J. C., TORRES, M. A. S., *Estudo do Dano Acumulado na Propagação da Trinca por Fadiga em Chapas de Alumínio de Alta Resistência Submetida a Carregamento de Amplitude Variável*, ABCM Mechanical Engineering Conference, p.-(9-12), 1991.



