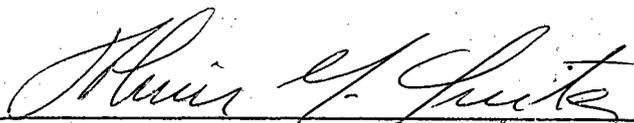


DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE LONGO ALCANCE ATRAVÉS  
DE ENSAIOS DE RELAXAÇÃO, EM TITÂNIO POLICRISTALINO

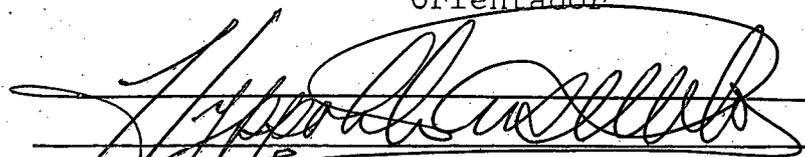
Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de  
Mestre em Ciências

Especialidade Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma  
final pelo Programa de Pós-Graduação.



Prof. Almir Monteiro Quites, M.Sc.

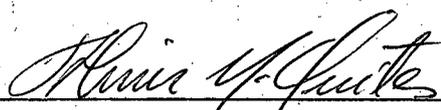
Orientador



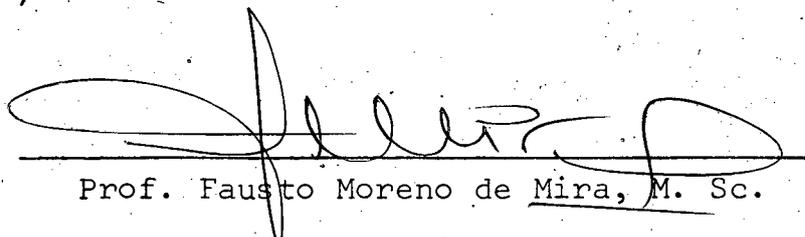
Prof. Hippolito do Valle Pereira Filho, Ph.D.

Integrador Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Elétrica e Industrial

Apresentada perante a banca examinadora composta  
dos seguintes professores:



Prof. Sergio Neves Monteiro, Ph. D.



Prof. Fausto Moreno de Mira, M. Sc.

A G R A D E C I M E N T O S

Sinceramente agradeço

- Ao Prof. Almir Monteiro Quites, que me orientou neste trabalho.
- Ao Prof. Sérgio Neves Monteiro, pela grande ajuda prestada durante os ensaios de relaxação.
- Ao Eng<sup>o</sup> Marco Antônio Meirelles Pires e ao acadêmico Paulo Emilio Miranda, pela cooperação prestada .
- Ao Instituto de Engenharia Nuclear - LEM, pelo uso do equipamento Instron.
- Ao BNDE-FUNTEC-213 e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pelas bolsas concedidas.

S U M Á R I O

1 - <u>INTRODUÇÃO</u> .....	01
2 - <u>REVISÃO TEÓRICA</u> .....	08
3 - <u>PARTE EXPERIMENTAL</u> .....	12
3.1 - Equipamento usado .....	12
3.2 - Recozimento e Micrografia .....	13
3.3 - Corpos de Prova .....	17
3.4 - Ensaio Propostos .....	18
4 - <u>ENSAIOS DE RELAXAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA CARGA RESIDUAL</u> ....	25
5 - <u>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</u> .....	50
5.1 - Discussão sobre a Variação da Tensão Residual com a Temperatura .....	64
5.2 - Discussão sobre a Variação da Tensão Residual com a Velocidade de Deformação .....	65
5.3 - Verificação matemática do Método de Li .....	67
6 - <u>CONCLUSÕES</u> .....	69
<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	70
<u>APÊNDICE 1</u> - Ensaio de Relaxação Relacionados em Ordem Cronológica .....	72
<u>APÊNDICE 2</u> - Curvas de Relaxação Fornecidas pela Instron para 5 Ensaio .....	75
<u>APÊNDICE 3</u> - Respostas do Computador para 3 Ensaio .....	81
<u>APÊNDICE 4</u> - Listagem do Programa de Computador - Interpola- ção Linear de Cargas e Cálculo de tangentes $dQ/d \ln t$ .....	88

R E S U M O

Pesquisadores procuraram mostrar a influência da temperatura sobre o comportamento plástico dos metais. A tensão  $\sigma$  aplicada no material seria decomposta em duas parcelas, uma atérmica  $\sigma_L$  e outra dependente da temperatura  $\sigma^*$ . Alguns métodos foram propostos para a determinação destas componentes.

O presente trabalho, procura averiguar a validade de um dos métodos propostos, usando como material, titânio  $\alpha$  policristalino. Seus resultados, embora qualitativos, fornecem razões para contestar a natureza atérmica para a componente  $\sigma_L$ .

A B S T R A C T

Some researchers have tried to find out the influence of temperature on plastic behaviour of metals . A tension  $\sigma$  applied on a certain material would be decomposed into two components:  $\sigma_L$ , athermal and  $\sigma^*$ , which is thermal dependent.

Some methods have been proposed to determinate such components.

Present work tries to verify one of these methods, by using polycrystalline  $\alpha$  Ti; obtained data, gave us reasons to contest the athermal nature of  $\sigma_L$  component.

## 1 - I N T R O D U Ç Ã O

Três pesquisadores, Orava, Stone e Conrad <sup>1</sup>, em um trabalho com titânio comercialmente puro, concluíram que a tensão de escoamento tornava-se constante, a partir de uma determinada temperatura.

Este valor constante, seria então a componente atérmica  $\sigma_L$ . Por subtração de tensão total, encontrar-se-ia a componente termicamente ativada  $\sigma^*$ . A figura 1 ilustra o fato. Outros materiais foram testados, obtendo-se curvas semelhantes à do titânio, como ilustram as figuras 2, 3 e 4. Mais tarde, Sérgio N. Monteiro, A. Santhanam e R. Reed-Hill <sup>2</sup>, também trabalhando com titânio policristalino em altas temperaturas, mostraram que existe uma zona com anormalidades no mecanismo de deformação entre as temperaturas de 500 e 800 °K, conforme mostra a figura 5.

Os autores sugerem que nesse intervalo, ocorrem fenômenos de envelhecimento, causados por interações entre discordâncias (dislocations) e impurezas.

Observa-se que na zona anômala (500 a 800 °K), a curva toma a configuração aproximada de um degrau, que coincide em valores de temperatura, com o patamar encontrado na curva de Orava, Stone e Conrad. Pode-se então deduzir que, se Orava, Stone e Conrad, tivessem dado prosseguimento a seus ensaios em temperaturas mais elevadas, possivelmente não concluiriam ter encontrado a componente atérmica  $\sigma_L$ . A figura 6 mostra a tendência de patamar nas curvas tensão x temperatura para cobre e alumínio entre 200 e 500 °K.

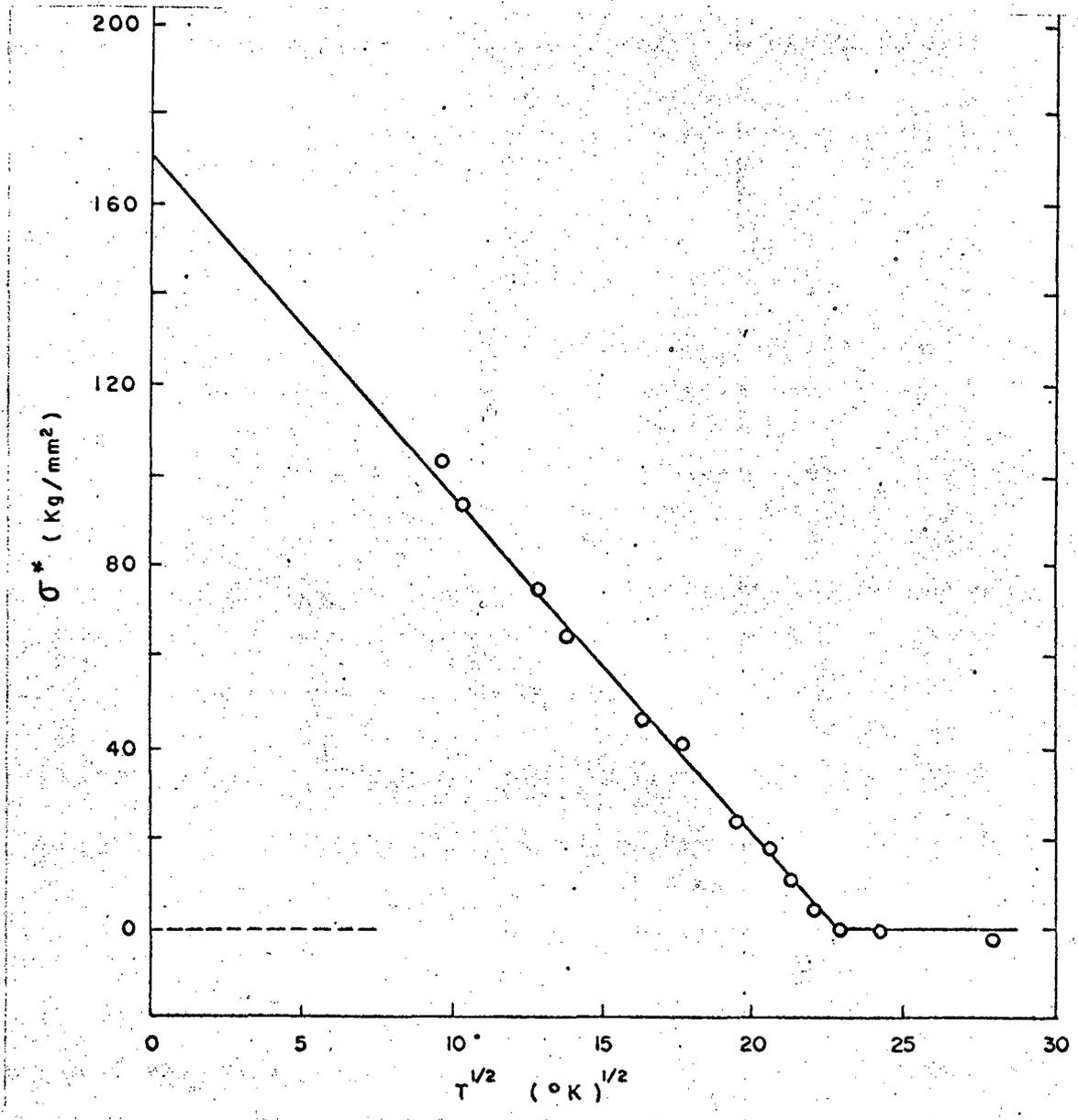


FIGURA 1 - Variação da componente termicamente ativada de tensão com a temperatura, para Titânio, proposta por Orava, Stone e Conrad.

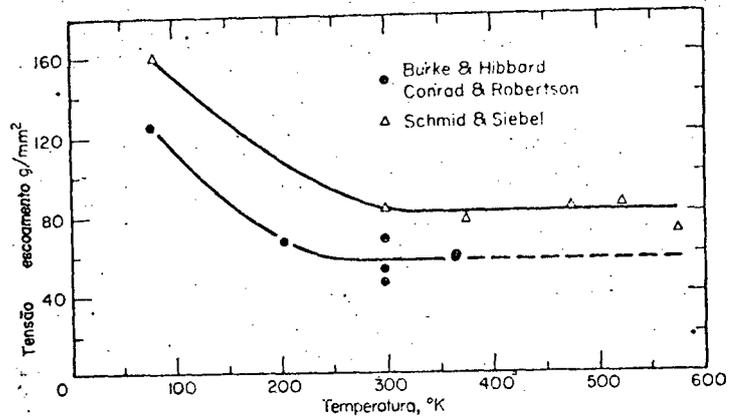


FIGURA 2 - Variação da tensão de cisalhamento com a temperatura, para Magnésio.<sup>20</sup>

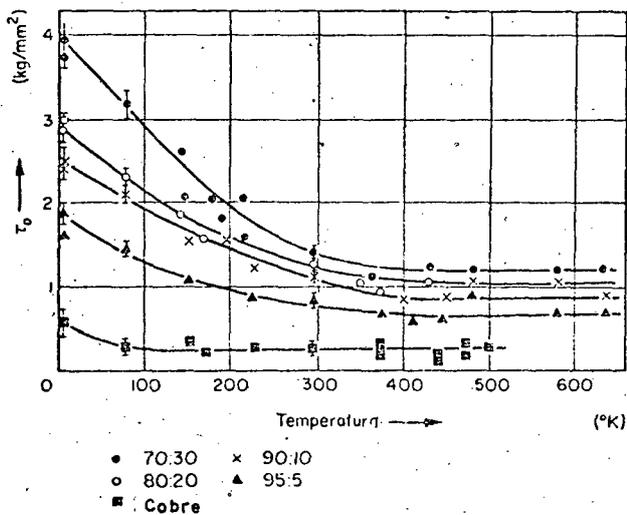


FIGURA 3 - Variação da tensão de cisalhamento com a temperatura, para cristais de Cobre e Latões.<sup>21</sup>

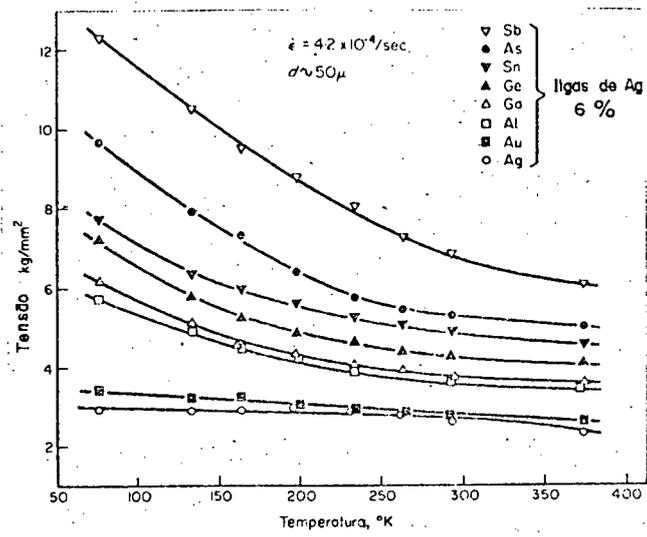


FIGURA 4 - Variação da tensão de escoamento com a temperatura, para prata e suas ligas.<sup>22</sup>

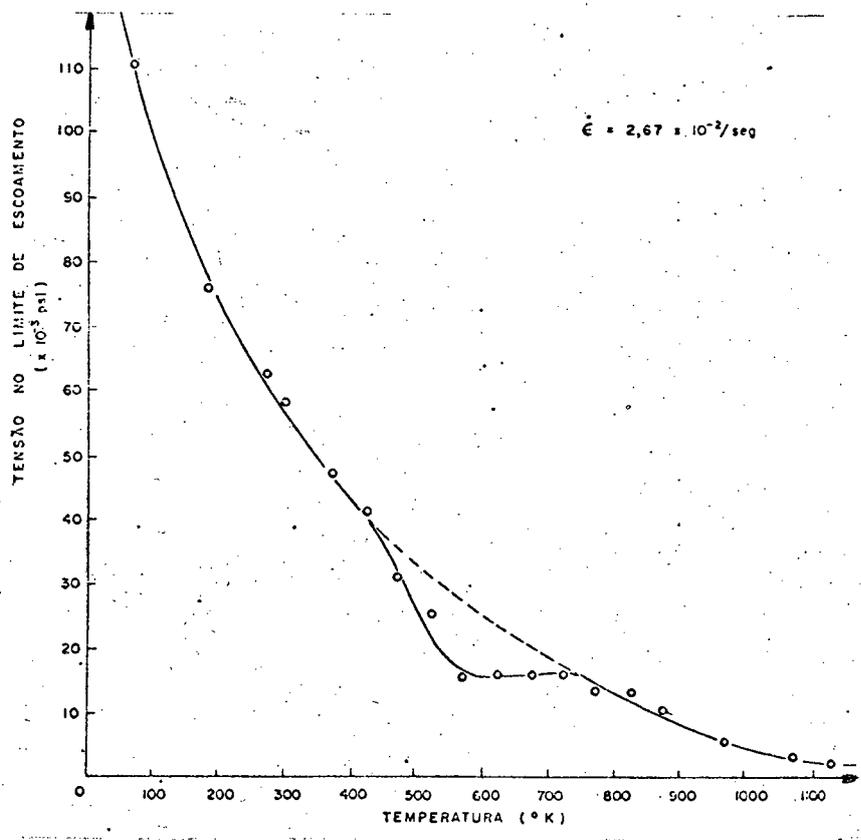


FIGURA 5 - Variação da tensão de escoamento com a temperatura, para Titânio.<sup>2</sup>

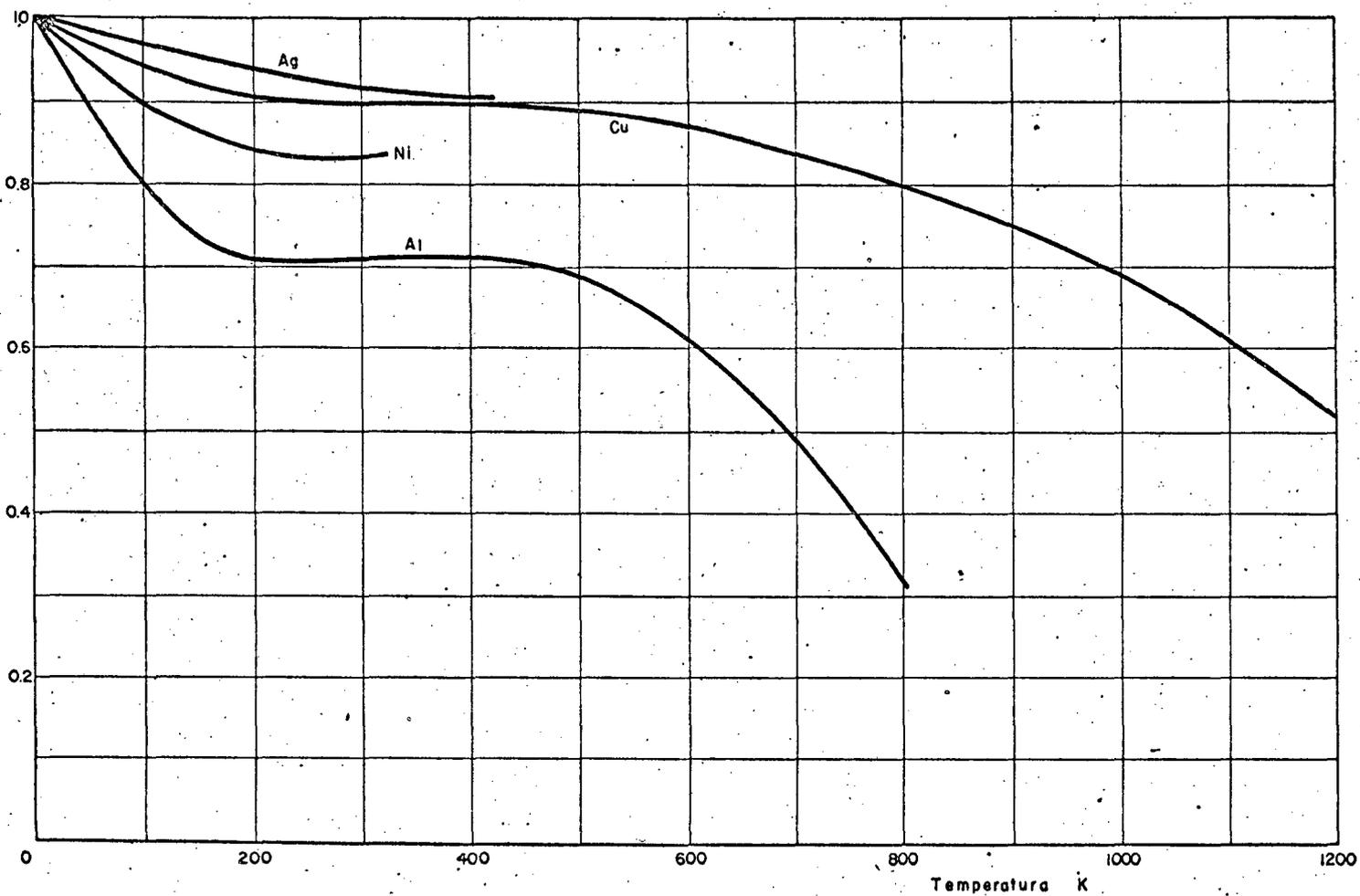


FIGURA 6 - Variação da tensão de escoamento com a temperatura, para diversos materiais.<sup>2 1</sup>

Uma alternativa desenvolvida por Li <sup>3</sup>, é apresentada por Evans e Rawlings <sup>4</sup>. Por este método, a variação da tensão durante a relaxação, deve se adaptar a uma relação da forma:

$$\sigma = \sigma_L + \kappa (t + a)^{\frac{n^*}{n^*-1}} \quad (1)$$

onde  $t$  é o tempo de relaxação,  $a$  e  $\kappa$  são constantes e  $n^*$  é definido por:

$$n^* = \left. \frac{\partial \ln \sigma^*}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_{T, \epsilon} \quad (2)$$

Assim, um gráfico onde os eixos coordenados representem  $-\frac{\partial \sigma}{\partial \ln t}$  e  $\sigma$ , interceptaria o eixo das tensões em  $\sigma_L$ .

É importante a observação de que o objetivo do trabalho é a pesquisa qualitativa do comportamento da componente  $\sigma_L$ , em relação às variáveis temperatura e velocidade de deformação.

Os resultados mostram claramente uma grande dependência de  $\sigma_L$  em relação a estas variáveis.

C A P I T U L O . I

## 2 - REVISÃO TEÓRICA

Seeger <sup>5,6</sup> deduziu uma expressão para o escoamento da seguinte forma: a deformação  $\epsilon$  observada, é expressa em função do número de discordâncias  $N$  por unidade de volume, movendo-se em uma área  $A$  do plano de deslizamento e do vetor de Burgers  $b$ . Então,

$$\epsilon = b \cdot A \cdot N \quad (3)$$

Por certo, existirão obstáculos ao movimento das discordâncias, os quais serão vencidos ou pelo aumento da tensão aplicada ou por energia térmica.

A energia de ativação requerida,  $U(\tau)$ , dependerá então, da tensão de cisalhamento aplicada. A velocidade de deformação é então expressa, como

$$\dot{\epsilon} = b \cdot A \cdot N \cdot V_0 \cdot \exp \left[ - \frac{U(\tau)}{K T} \right] \quad (4)$$

onde  $V_0$  é o fator frequência, determinado pela natureza dos obstáculos e  $K$  é a constante de Boltzmann. Se esta equação for resolvida para  $\tau$ , tem-se uma expressão relacionando  $\tau$  a  $T$  e  $\dot{\epsilon}$ , mas antes, é preciso mais informações a respeito de  $U(\tau)$ .

Seeger supôs que  $\tau$  era composto de dois componentes  $\tau_L$  e  $\tau^*$ . O componente  $\tau_L$  provinha da interação de discordâncias paralelas sobre o plano primário de deslizamento, todas possuindo o mesmo vetor de Burgers. A dimensão do campo interno de tensão, resultante destas interações, seria aproximadamente  $i$

igual à distância entre discordâncias, aproximadamente  $10^{-4}$  cm em um metal recozido. Esta distância é atômicamente tão grande, que flutuações térmicas não ajudariam a tensão aplicada a vencer o obstáculo. Como consequência,  $\tau_L$  não dependeria da temperatura.

O outro componente  $\tau^*$  relaciona-se com interações de discordâncias, causando deslizamento com existência de "florestas" de discordâncias, as quais atravessam o plano de deslizamento. Quando discordâncias móveis atingem a "floresta", degraus (jogs) são formados, dificultando assim, a continuação do movimento. O componente  $\tau^*$  é fortemente sensível à temperatura, porque a ativação térmica auxilia o movimento destes degraus.

Seeger supôs que existe uma relação linear entre a energia de ativação e a tensão aplicada, dada por

$$U = U_0 - v (\tau - \tau_L) \quad (5)$$

onde  $U$  é a energia de ativação aparente e  $v$  é o volume de ativação.

Das expressões (4) e (5), pode-se concluir que

$$\tau = \tau_L + \tau^* = \tau_L + \frac{U_0 - K T \ln(N A b V_0 / \dot{\epsilon})}{v} \quad (6)$$

Nota-se pela expressão (6) que, para altas temperaturas, o termo  $\tau^*$  desaparece e a ativação térmica não necessita de auxílio de tensão para mover as discordâncias de deslizamento primário através da "floresta". Entretanto, o termo  $\tau_L$  permaneceria inalterado quando variasse a temperatura.

A partir daí, Orava, Stone e Conrad fizeram pesquisas com vários materiais, inclusive titânio, onde encontraram o patamar, que supuseram tratar-se da componente atérmica de tensão  $\sigma_L$ .

Porém, com o trabalho de Monteiro, Sauthanam e Reed - Hill (ver figura 5), tal suposição deve ser abandonada. Então, Evans e Rawlings apresentaram o método desenvolvido por Li, onde se encontraria a componente atérmica  $\sigma_L$ , através de ensaios de relaxação.

O valor da carga, no ensaio de relaxação, que não varia com o tempo (carga residual), corresponde à componente  $\sigma_L$ .

Tomando-se este método, foram realizados neste trabalho, vários ensaios de relaxação em temperaturas e velocidades de deformação variadas.

CAPITULO I I

### 3 - PARTE EXPERIMENTAL

Foi ensaiado titânio  $\alpha$  policristalino, cedido pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica da COPPE-UFRJ.

A análise espectrográfica qualitativa é a seguinte :

Alumínio - nulo	Molibdênio - nulo
Cobre - < 0,01%	Zinco - nulo
Ferro - nulo	Mangânês - nulo
Silício - nulo	Vanádio - nulo
Magnésio - nulo	Estanho - nulo
Cromo - nulo	Boro - < 0,001%
Níquel - nulo	Titânio - restante

Esta análise, no entanto, não exclui a possibilidade de existência de carbono, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio.

A temperatura de fusão do titânio puro é aproximadamente 1.668 °C e a presença dessas impurezas tende aumentá-la.

#### 3.1 - Equipamento Usado

Foi utilizada uma máquina Instron, caracterizada por acionamento mecânico de grande precisão e com variada gama de velocidades. O registro da carga é feito por célula elétrica tipo "straingage", numa faixa de 2 a 10.000 kgf.

Nos ensaios a altas temperaturas, foi usado um forno com cápsula tubular vertical, com três zonas de aquecimento por resistências elétricas e com controle automático de temperatura.

Também foi usado um sistema de vácuo, com o intuito de proteger tanto o corpo de prova, para não afetar os resultados, bem como o equipamento, contra oxidações.

### 3.2 - Recozimento e Micrografia

O recozimento foi realizado a temperatura de  $923^{\circ}\text{K}$ , durante um tempo de duas horas e meia, com subsequente resfriamento em água.

A atmosfera do forno foi mantida neutra, pela circulação contínua de gás argônio.

Para o exame micrográfico, foram retiradas 3 amostras de corpos de prova diferentes : duas amostras relativas a secções transversais e uma relativa à secção longitudinal.

O tamanho médio de grão foi medido em torno de  $35 \mu$ .

As figuras 7 e 8 correspondem às secções transversais e a figura 9 à secção longitudinal do corpo de prova.

Notam-se nestas figuras, as marcas dos testes de microdurezas.

Os ensaios indicaram microdureza de 38 Rc nas figuras 7 e 8 e 37 Rc na figura 9.

Observa-se ainda, nas micrografias, uma grande quantidade de precipitados de impurezas ( possivelmente carbono em forma de hidratos) e o formato equiaxial dos grãos, que vem a comprovar o tratamento de recozimento.

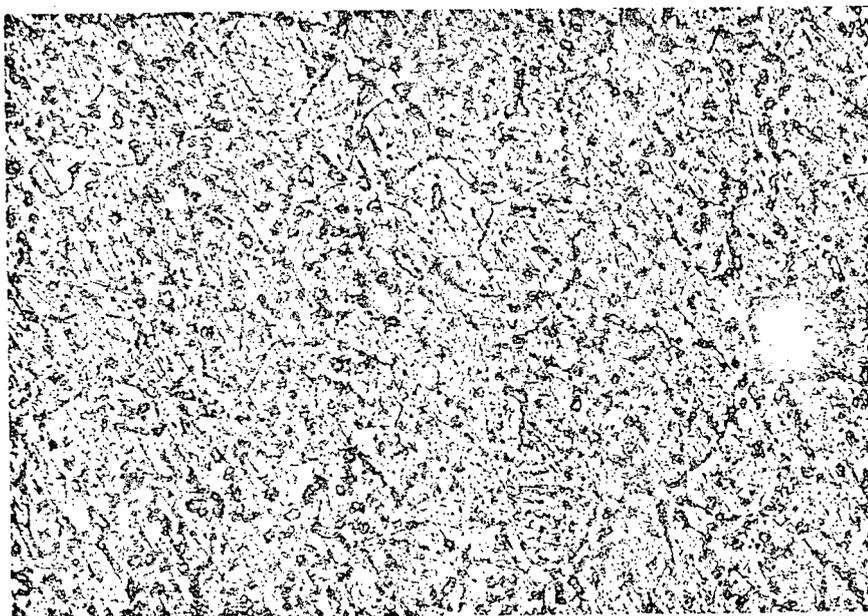


FIGURA 7 - Micrografia de secção transversal de  
corpo de prova de Titânio.

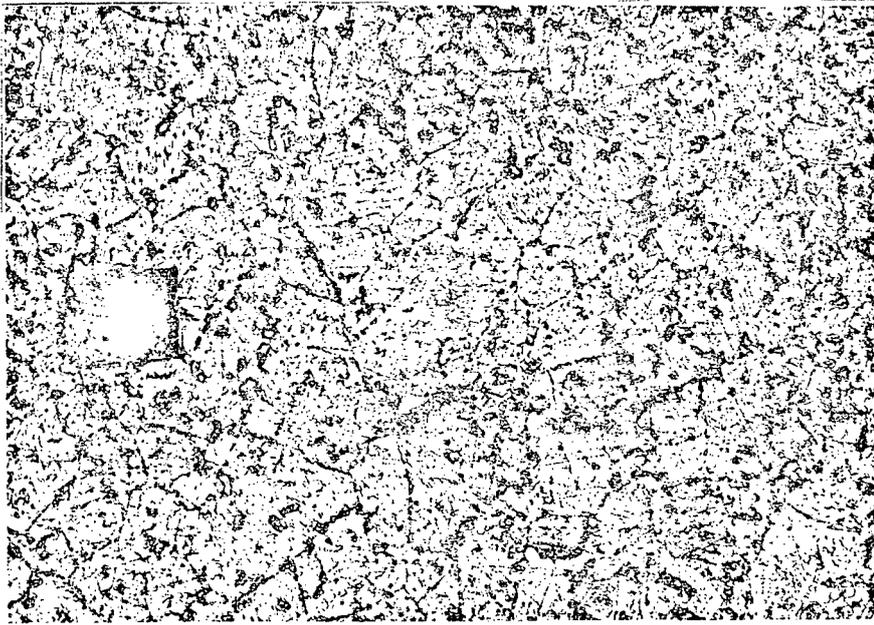


FIGURA 8 - Micrografia de secção transversal  
de corpo de prova de Titânio.

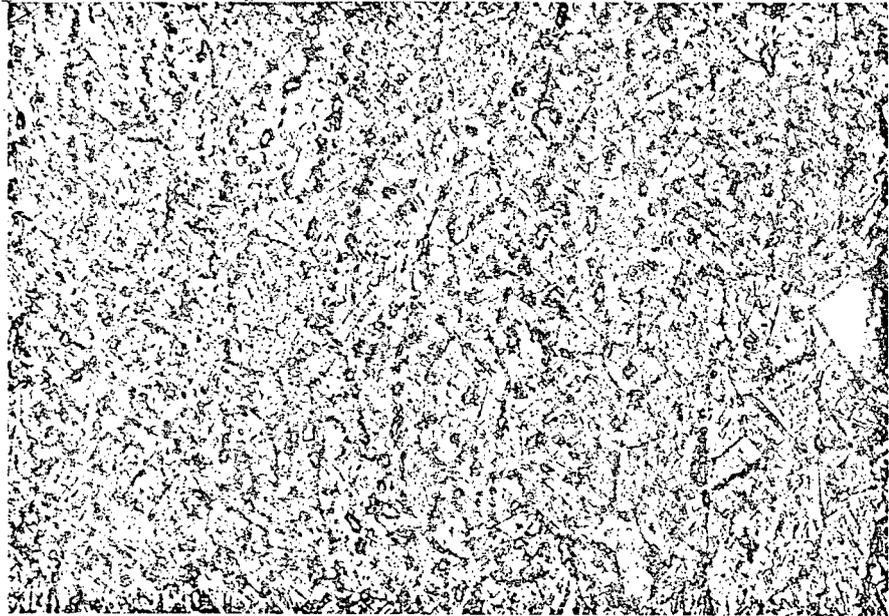


FIGURA 9 - Micrografia de secção longitudinal  
de corpo de prova de Titânio 312 X.

O reagente para o ataque, teve a seguinte composição?

Ácido fluorídrico	-	1,5 ml
Ácido nítrico	-	3,5 ml
Água	-	95,0 ml

Quanto à homogeneidade do material, Quites<sup>8</sup>, já havia pesquisado em 1970.

Como o material referente ao presente trabalho foi proveniente da mesma partida e como o tratamento térmico dado aos corpos de prova foi idêntico, pode-se pressupor a sua homogeneidade.

Os valores encontrados, de dureza e tamanho de grão, realmente conferem com os valores obtidos por aquele autor.

### 3.3 - Corpos de Prova

Corpos de prova foram preparados e examinados em projetor de perfil.

Aqueles que apresentaram defeitos de forma foram rejeitados.

Os demais apresentados na tabela 1, foram medidos no próprio projetor, para permitir o cálculo de tensões e deformações, a partir das medidas reais de cada um dos corpos de prova.

A figura 10, mostra o seu formato.

### 3.4 - Ensaaios Propostos

A tabela 2 mostra a programação dos ensaios de relaxação na máquina Instron.

As interpolações, tiveram as seguintes razões de ser:

- Os ensaios foram realizados fora da instituição de origem e como são de longa duração, optou-se pela tabela com interpolações, uma vez que a tabela completa acarretaria um consumo de tempo por demais elevado.
- O objetivo, como já foi mencionado, é a realização de uma análise mais qualitativa do que quantitativa, de modo que, o número de ensaios realizados, torna-se suficiente para este escopo.
- Os diagramas tensão versus temperatura e tensão versus velocidade de deformação, fornecem curvas contínuas, de modo que, fácil se tornam as interpolações em forma matricial. Pela tabela 2, observa-se que cada ponto interpolado, está cercado por dois pontos ensaiados, tanto na mesma velocidade de deformação como na mesma temperatura, o que garante a interpolação matricial.

Relacionando-se agora, as características fornecidas pela máquina com as grandezas interessantes, tem-se:

$$\Delta l = \kappa \Delta_p \quad (7)$$

onde  $\Delta l$  é a variação de comprimento do corpo de prova traciona

do,  $\Delta_p$  a distância percorrida pelo gráfico da instron sobre o eixo das deformações (abscissa), durante o tracionamento do corpo de prova e  $\kappa$  é uma constante.

A partir da fórmula (7), chega-se à seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta_p \times v_{\text{ponte}}}{l \times v_{\text{graf}}} \quad (8)$$

onde  $\varepsilon$  é a deformação sofrida pelo corpo de prova,  $v_{\text{ponte}}$  e  $v_{\text{graf}}$  são as velocidades da ponte e gráfico respectivamente.

A velocidade de deformação, será então:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta_p \times v_{\text{ponte}}}{l \times \Delta t \times v_{\text{graf}}} \quad (9)$$

A figura 11 serve como exemplo.

TABELA 1

C P Nº	l (mm)	$\phi$ (mm)
1	22,27	3,00
2	21,20	3,07
3	20,65	3,04
4	22,40	3,00
5	20,17	2,98
6	22,80	2,94
7	22,34	2,97
8	21,72	3,03
9	22,10	3,00
10	20,36	2,96
11	22,82	3,00
12	22,80	2,98
13	24,27	2,97
14	22,00	3,00
15	22,10	3,00
16	21,05	3,00
17	22,37	3,00
18	24,17	2,96
19	22,00	2,99
20	25,28	3,00
21	22,18	3,00

TABELA 1: Dimensões dos corpos de prova

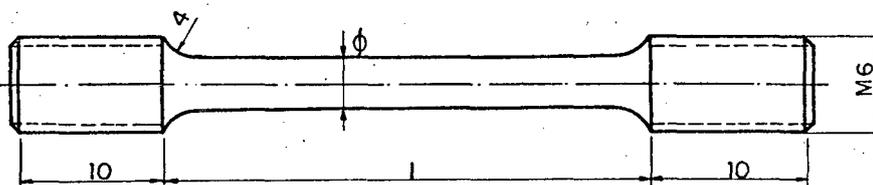


FIGURA 10 - Corpo de prova de Titânio para ensaios de relaxação na máquina Instron.

TABELA 2

	cm/min	VELOCIDADE DA PONTE			
	°K	0,005	0,05	0,5	2
T E M P E R A T U R A	298	x	x	x	x
	373	-	x	-	x
	473	x	-	x	-
	523	-	x	x	x
	573	x	-	x	-
	673	-	x	-	x
	773	x	-	x	-

x : ensaio executado

- : valor interpolado

TABELA 2 - Programação dos ensaios  
de relaxação

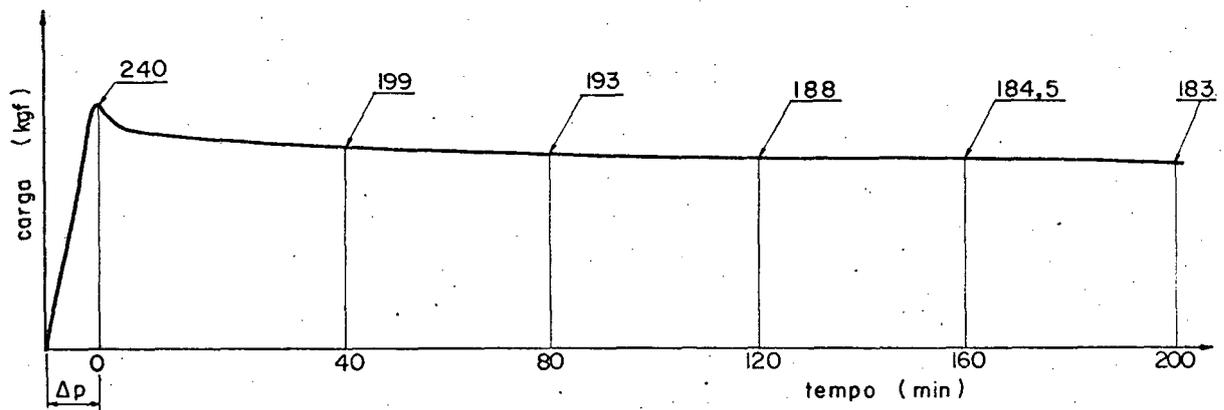


FIGURA 11 - Ensaio de relaxação.

$$T = 298^{\circ}\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

C A P I T U L O   I I I

#### 4 - ENSAIOS DE RELAXAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA CARGA RESIDUAL

A tabela 3 mostra os ensaios significativos em ordem crescente de temperatura e velocidade de deformação.

A figura 11 ilustra o ensaio de relaxação nas condições de 298 °K e  $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Nos ensaios, são lidos os valores de carga versus tempo, que, medidas em intervalos de 10 minutos, fornecem as tabelas de números 4 a 20.

Os valores destas tabelas foram lançados como dados para o computador, que realizava interpolações em intervalos de 2 minutos, além de calcular os logaritmos neperianos do tempo e as derivadas  $dQ/d \ln t$ , onde  $Q$  representa a carga, em um determinado instante. As interpolações nos valores das cargas, são feitas por cálculo linear e a tangente em um determinado ponto, calculada através da secante, referente aos pontos vizinhos anterior e posterior.

Alguns resultados do computador, bem como sua listagem, encontram-se em apêndice.

Utilizando-se então, o método de Li, encontra-se o valor de  $Q_L$  (carga residual), pela intersecção do gráfico

$$\frac{dQ}{d \ln t} \times Q$$

sobre o eixo das cargas, como mostra a figura 12.

Observa-se nessa figura que o trecho final, toma a forma de uma reta, possibilitando assim, através de seu prolongamento, a determinação de  $Q_L$ .

De posse das tabelas fornecidas pelo computador, as quais informam as cargas  $Q$  e as correspondentes derivadas

$$\frac{dQ}{d \ln t}$$

(ver. tabelas em apêndice), ajustam-se retas referentes aos pontos finais, através do método dos mínimos quadrados. Onde estas retas interceptam o eixo das cargas, encontram-se os valores correspondentes a  $Q_L$ . As figuras 13 e 14 servem como exemplo, referentes aos ensaios 6 e 17 (Ver tabela 3).

A tabela 21, apresenta os valores das cargas residuais, assim determinadas, para todos os ensaios realizados.

T A B E L A 3

ENSAIO Nº	C.P. Nº	TEMPERATURA (°K)	VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO (s <sup>-1</sup> )
23	16	298	4 x 10 <sup>-5</sup>
24	16	298	4 x 10 <sup>-4</sup>
25	16	298	4 x 10 <sup>-3</sup>
26	16	298	1,6 x 10 <sup>-2</sup>
6	4	373	4 x 10 <sup>-4</sup>
22	14	373	1,6 x 10 <sup>-2</sup>
18	10	473	4 x 10 <sup>-5</sup>
20	12	473	4 x 10 <sup>-3</sup>
9	6	523	4 x 10 <sup>-4</sup>
10	6	523	4 x 10 <sup>-3</sup>
11	6	523	1,6 x 10 <sup>-2</sup>
12	7	573	4 x 10 <sup>-5</sup>
13	7	573	4 x 10 <sup>-3</sup>
14	8	673	4 x 10 <sup>-4</sup>
15	8	673	1,6 x 10 <sup>-2</sup>
21	13	773	4 x 10 <sup>-5</sup>
17	9	773	4 x 10 <sup>-3</sup>

TABELA 3 - Ensaio de Relaxação Relacionados em Ordem Crescente de Temperatura e Velocidade de Deformação

## T A B E L A 4

## ENSAIO Nº 23

$$T = 298 \text{ }^{\circ}\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	240
10	208
20	205
30	202
40	199
50	196
60	195
70	194
80	193
90	192
100	190
110	189
120	188
130	187
140	186
150	185
160	184,5
170	184
180	183,5
190	183,2
200	183

TABELA 4 - Tabela de Ensaio  
de Relaxação,  
Tempo x Carga

## T A B E L A 5

ENSAIO Nº 24

$$T = 298 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	285
10	230
20	225
30	221
40	218
50	215
60	214
70	212
80	210
90	209
100	208
110	206
120	205
130	204
140	203
150	202
160	201,3
170	200,7
180	200,2

TABELA 5 - Tabela de Ensaio de Relaxação,  
Tempo x Carga.

## T A B E L A 6

ENSAIO Nº 25

 $T = 298 \text{ }^{\circ}\text{K}$        $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	316
10	244
20	236
30	232
40	229
50	227
60	225
70	224
80	223
90	222
100	221
110	220
120	218
130	216
140	215
150	214
160	213,5
170	213
180	212,6
190	212,2
200	211,8
210	211,5

TABELA 6 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 7

ENSAIO Nº 26

$$T = 298 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	345
13	252
23	246
33	244
43	238
53	235
63	233
73	232
83	230
93	228
103	227
113	225,5
123	224
133	222,5
143	221
153	219,5
163	218,4
173	217,4
183	216,7
193	216,2
203	215,8

TABELA 7 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 8

## ENSAIO Nº 6

$$T = 373 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	190
10	134
20	133
30	132
40	131
50	130
60	129
70	128
80	127
90	126
100	125
110	124
120	123
130	122
140	121,5
150	121
160	120,6
170	120,3
180	120,1
190	120
200	119,9

TABELA 8 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

TABELA 9

ENSAIO Nº 22

$T = 373 \text{ } ^\circ\text{K}$        $\dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	320
10	205
30	160
40	143
50	132
60	123
70	115
80	110
90	107
100	104
110	103
120	102
130	101
140	100
150	99,5
160	99
170	98,6
180	98,2
190	97,9
200	97,7
210	97,6

TABELA 9 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 10

## ENSAIO Nº 18

$$T = 473 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	265
10	230
20	225
30	224
40	221
50	219
60	214
70	210
80	205
90	203
100	202
110	201
120	200
130	197
140	195,5
150	194,5
160	193,8
170	193,4
180	193,2
190	193

TABELA 10- Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 11

ENSAIO Nº 20

$$T = 473 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	205
10	115
20	113
30	111
40	109
50	107
60	105
70	104
80	103
90	102
100	101
110	99
120	98
130	97
140	96,5
150	96,2
160	96

TABELA 11 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 12

ENSAIO Nº 9

 $T = 523 \text{ }^{\circ}\text{K}$        $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	87
10	30
20	20
30	19
40	18
50	17
60	16
70	15
80	14
90	13
100	12,5
110	12
120	11,5
130	11
140	10,5
150	10,1
160	9,7
170	9,3
180	9
190	8,7
200	8,5
210	8,3
220	8,1
230	8

TABELA 12 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 13

ENSAIO Nº 10

 $T = 523 \text{ }^{\circ}\text{K}$  $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	145
10	67
20	50
30	46
40	40
50	35
60	32
70	26
80	20
90	18,5
100	17,5
110	17
120	16,6
130	16,2
140	15,8
150	15,5
160	15,2
170	14,9
180	14,7
190	14,6

TABELA 13 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 14

ENSAIO Nº 11

 $T = 523 \text{ }^{\circ}\text{K}$        $\dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	160
10	83
20	77
30	75
40	73
50	71
60	69,5
70	68,4
80	67,4
90	66,4
100	65,4
110	64,4
120	63,4
130	62,7
140	62,1
150	61,6
160	61,2
170	60,8
180	60,5
190	60,2
200	60

TABELA 14 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 15

ENSAIO Nº 12

T = 573 °K

 $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	78
10	43
20	22
30	16
40	15
50	14,5
60	14
70	13,7
80	12
90	11,5
100	10
110	9
120	8
130	6,5
140	5,9
150	5,4
160	5
170	4,7
180	4,5
190	4,4

TABELA 15 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 16

ENSAIO Nº 13

$T = 573 \text{ } ^\circ\text{K}$

$\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	105
10	68
20	58
30	52
40	48
50	44
60	42,5
70	41,5
80	40,5
90	39,5
100	38,5
110	37,5
120	36,5
130	35,8
140	35,3
150	34,9
160	34,6
170	34,3
180	34,1
190	33,9
200	33,8

TABELA 16 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 17

ENSAIO Nº 14

$$T = 673^{\circ}\text{K}$$

$$\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	66
10	23
20	14
30	10
40	8
50	7
60	6
70	5
80	4,2
90	3,5
100	3
110	2,7
120	2,5
130	2,3
140	2,2
150	2,15
160	2,11
170	2,07
180	2,04
190	2,02
200	2

TABELA 17 - Ensaio de Relaxação. Tempo x Carga

## T A B E L A 18

ENSAIO Nº 15

 $T = 673 \text{ }^{\circ}\text{K}$  $\dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	114
10	68
20	58
30	55
40	54
50	53
60	52,5
70	52
80	51,5
90	51
100	50,5
110	50
120	49,5
130	49
140	48,6
150	48,2
160	47,9
170	47,6
180	47,5
190	47,4

TABELA 18 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 19

ENSAIO Nº 21

 $T = 773 \text{ }^{\circ}\text{K}$  $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	143
10	110
20	90
30	75
40	65
50	45
60	35
70	21
80	15,3
90	14,7
100	14,2
110	13,7
120	13,3
130	12,9
140	12,5
150	12,1
160	11,8
170	11,5
180	11,3
190	11,1
200	11

TABELA 19 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 20

## ENSAIO Nº 17

$$T = 773 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	70
10	33
20	24
30	17
40	13
50	11
60	10
70	9,5
80	9
90	8,5
100	8
110	7,6
120	7,2
130	7
140	6,9
150	6,82
160	6,78
170	6,75
180	6,73
190	6,71
200	6,7

TABELA 20 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

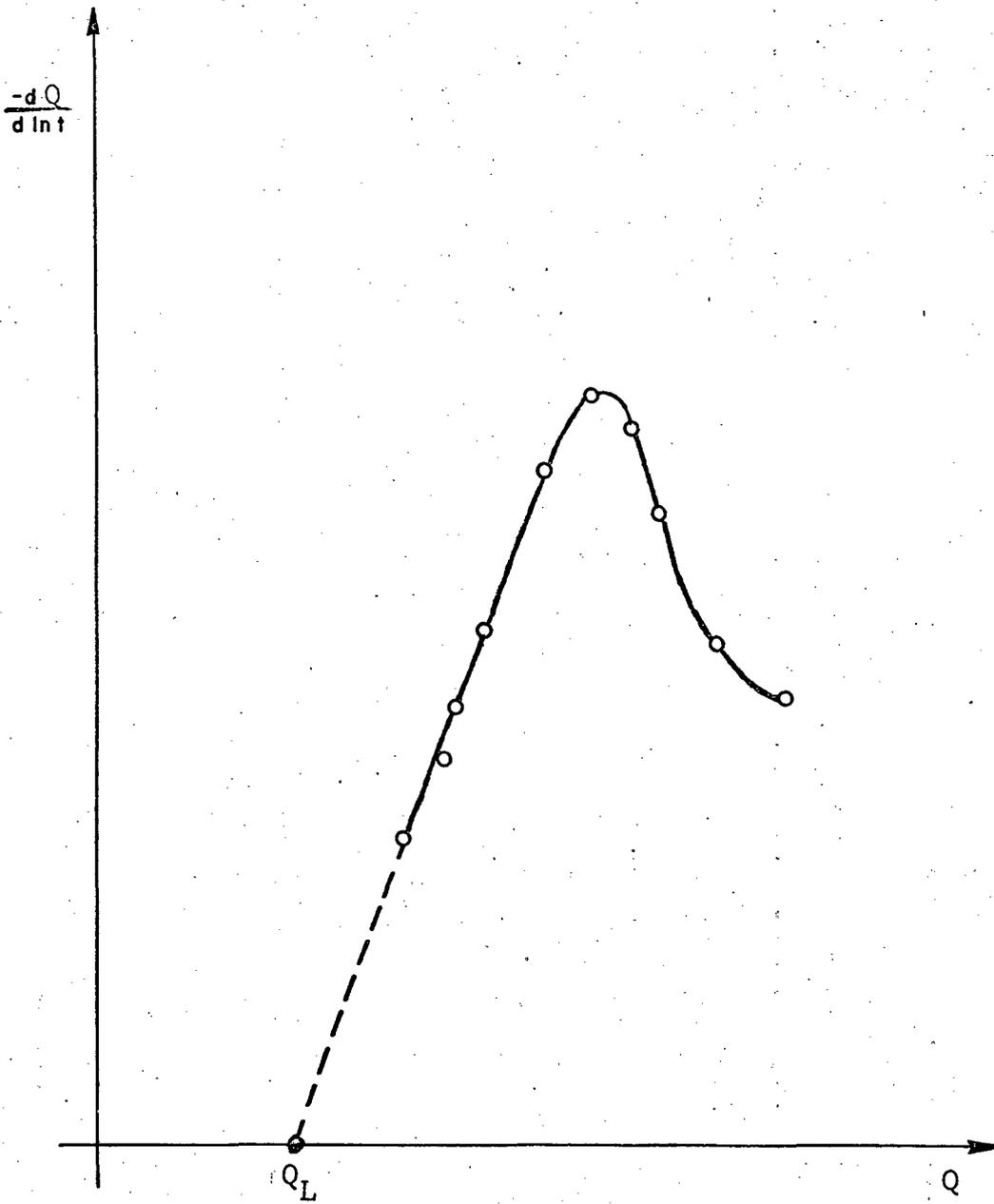


FIGURA 12 - Determinação da carga residual  $Q_L$  a partir do método de Li.

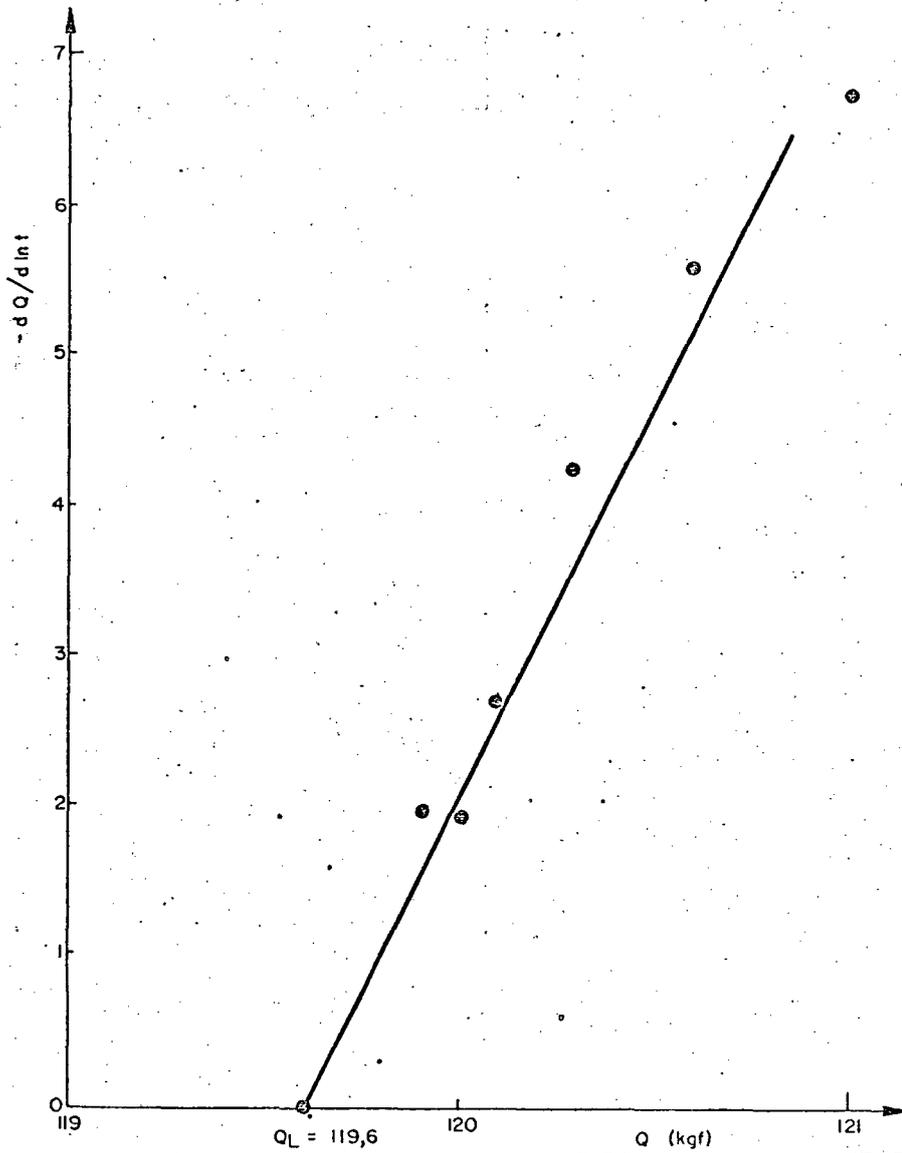


FIGURA 13 -- Determinação da componente residual de carga, através do método de Li.  
 $T = 373 \text{ }^\circ\text{K}$      $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

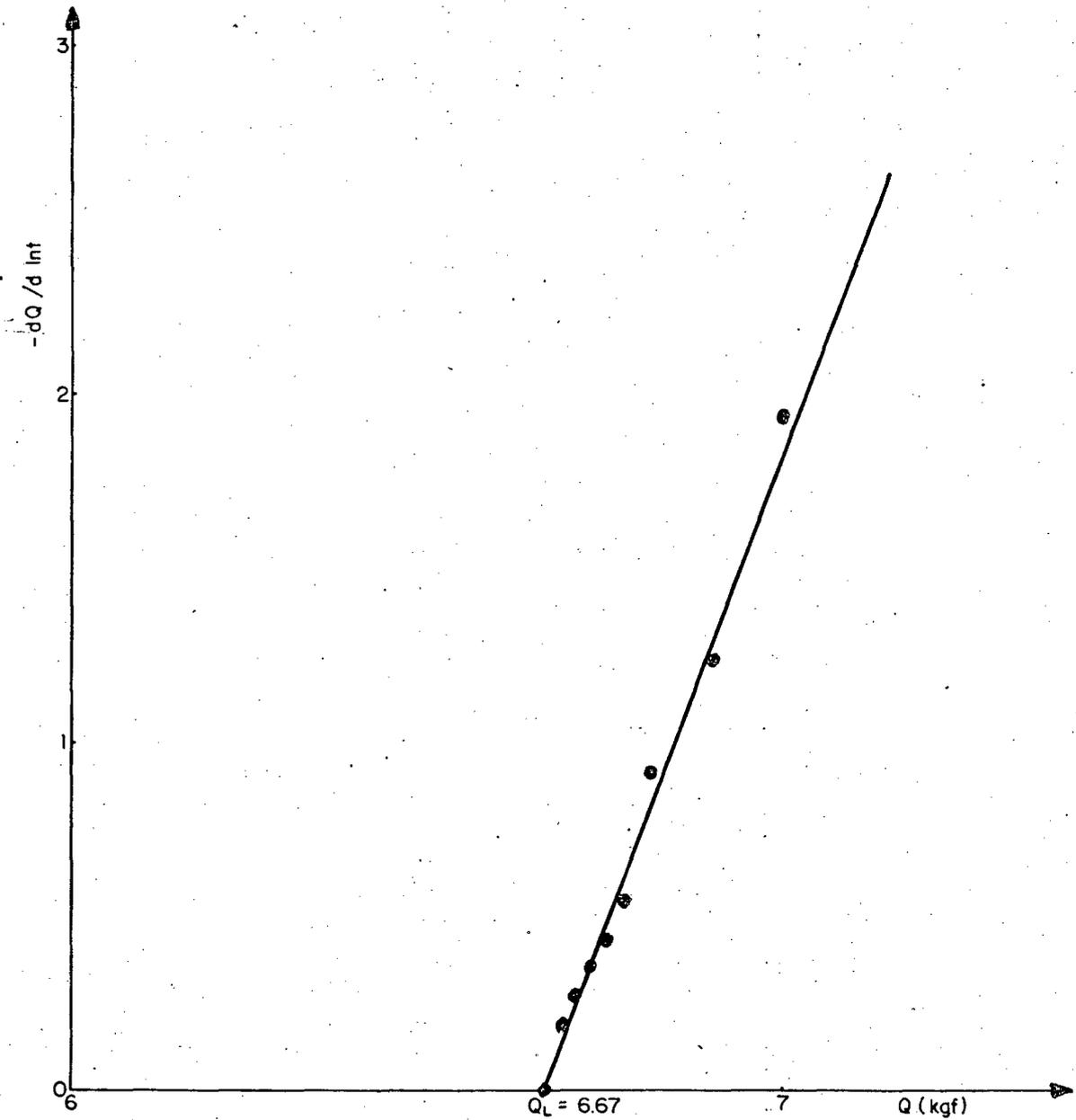


FIGURA 14 - Determinação da componente residual de carga, através do método de Li.

$$T = 773 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

T A B E L A 21

ENSAIO	Nº	T (°K)	$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	Q <sub>L</sub> (kgf)
23		298	4 x10 <sup>-5</sup>	181,5
24		298	4 x10 <sup>-4</sup>	197,1
25		298	4 x10 <sup>-3</sup>	209,8
26		298	1,6x10 <sup>-2</sup>	213,9
6		373	4 x10 <sup>-4</sup>	119,6
22		373	1,6x10 <sup>-2</sup>	96,5
18		473	4 x10 <sup>-5</sup>	192,5
20		473	4 x10 <sup>-3</sup>	94,1
9		523	4 x10 <sup>-4</sup>	6,7
10		523	4 x10 <sup>-3</sup>	14,4
11		523	1,6x10 <sup>-2</sup>	57,3
12		573	4 x10 <sup>-5</sup>	3,6
13		573	4 x10 <sup>-3</sup>	30,0
14		673	4 x10 <sup>-4</sup>	1,9
15		673	1,6x10 <sup>-2</sup>	46,5
21		773	4 x10 <sup>-5</sup>	0,7
17		773	4 x10 <sup>-3</sup>	6,67

TABELA 21 - Valores das Cargas Residuais

C A P I T U L O    I V

## 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 21 apresenta as cargas residuais  $Q_L$ . Sabendo-se as áreas das secções transversais, dos respectivos corpos de prova, tem-se os valores das tensões residuais  $\sigma_L$ .

A partir das tabelas 4 a 20, determinam-se os valores das tensões de início de escoamento, tomando-se os valores das cargas referentes ao tempo zero (deformação de 0,2%). Pela subtração da componente residual  $\sigma_L$  na tensão total  $\sigma_e$ , determina-se a componente termicamente ativada  $\sigma^*$ .

A tabela 22 apresenta os valores das tensões e suas componentes relativas aos ensaios realizados. O valor da tensão de escoamento relativa ao ensaio 18, resultou excessivamente elevado, possivelmente devido a encruamento do corpo de prova no ato de montagem na Instron.

Este ensaio então, foi mais tarde repetido e seu resultado é apresentado na tabela 23.

A partir desta tabela, seguindo-se o procedimento normal, foram encontrados os seguintes valores:

$$\begin{aligned} Q_L &= 44,63 \text{ kgf} \\ \sigma_L &= 6,37 \text{ kgf/mm}^2 \\ \sigma_e &= 13,20 \text{ kgf/mm}^2 \\ \sigma^* &= 6,83 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned}$$

Com os dados apresentados na tabela 22 ( com exceção do ensaio 18, os quais foram substituídos pelos novos valores), foram elaborados as curvas mostradas nas figuras 15 a 19, relacionadas

cionando valores de tensão e suas componentes, com temperatura e velocidade de deformação. Uma vez que trabalhos anteriores <sup>2</sup>, <sup>8</sup> nas mesmas condições, demonstraram que num diagrama bi-logaritmico a tensão de escoamento e a velocidade de deformação ajustam-se a uma reta, interpolações lineares, podem então ser realizadas.

No diagrama bi-logaritmico tensão residual e velocidade de deformação, verifica-se também, a variação linear na temperatura ambiente. Nas demais temperaturas, os dados não são suficientes para que se possa verificar a persistência da aludida linearidade. As retas tracejadas, serviram apenas para indicar a pertinência dos pontos a uma mesma temperatura. As interpolações foram feitas na hipótese de persistir a linearidade já referida.

A partir das curvas relativas às figuras 15 a 19, foram interpolados, então, os demais valores de  $\sigma_e$ ,  $\sigma_L$  e  $\sigma^*$ .

A tabela 24 apresenta os resultados finais.

Pela figura 16, nota-se a tendência de "patamar" na tensão de escoamento, a partir de 500 °K, o que está de acordo com as experiências já mencionadas <sup>2</sup>; <sup>8</sup>.

Pelas figuras 17 e 18 nota-se que a tensão residual  $\sigma_L$  varia tanto com a temperatura como com a velocidade de deformação. Portanto, existem evidências de que a natureza atômica, proposta por Seeger, não é adequada para a componente residual encontrada através do método de Li.

Observa-se que  $\sigma_L$  varia muito pouco em relação à velocidade de deformação, nas mais baixas temperaturas (até 500 °K), enquanto nas mais altas, apresenta uma variação mais significativa (ver figura 17).

Comparando-se as figuras 16 e 18, fica evidenciada a mesma tendência de "zona anômala", tanto nas curvas de tensão de escoamento como nas curvas de tensão residual, em temperaturas acima de 500 °K.

Pela figura 19, entretanto, observa-se que em temperaturas em torno de 573 °K (zona anômala), os valores da componente termicamente ativada praticamente não dependem de  $\dot{\epsilon}$ .

Evans<sup>9</sup>, trabalhando com titânio, baseado em trabalhos de Conrad<sup>10</sup> e Levine<sup>11</sup>, mostra que existe uma variação no mecanismo de deformação, na temperatura de 375 °K, onde, pela figura 18, torna-se evidente a tendência da pequena variação de  $\sigma_L$ , nas vizinhanças desta temperatura, em relação à velocidade de deformação. Devido a esta particularidade, os ensaios correspondentes a esta temperatura foram repetidos (dai a existência de mais pontos nesta temperatura) e seus resultados confirmam a mesma tendência (Ver tabelas 25 e 26), dando os seguintes valores:

$$Q_L = 99,5 \text{ kgf}$$

$$\sigma_L = 13,7 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_e = 26,2 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma^* = 12,5 \text{ kgf/mm}^2, \text{ para } T = 373^\circ\text{K e } \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$Q_L = 74,7 \text{ kgf}$$

$$\sigma_L = 10,3 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_e = 42,7 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma^* = 32,4 \text{ kgf/mm}^2, \text{ para } T = 373^\circ\text{K e } \dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Seria interessante que outros trabalhos fossem realizados nesta zona de temperaturas, com o objetivo de procurar mecanismos que expliquem inclusive o aparente comportamento de  $\sigma_L$  variar inversamente com a velocidade de deformação.

Para isso, uma análise quantitativa seria necessário.

T A B E L A 22

ENSAIO Nº	T (°K)	$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	$\sigma_L$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma^*$ (kgf/mm <sup>2</sup> )
23	298	4 x10 <sup>-5</sup>	25,68	33,95	8,27
24	298	4 x10 <sup>-4</sup>	28,00	40,32	12,32
25	298	4 x10 <sup>-3</sup>	29,68	44,70	15,02
26	298	1,6x10 <sup>-2</sup>	30,26	48,81	18,55
6	373	4 x10 <sup>-4</sup>	16,92	26,88	9,96
22	373	1,6x10 <sup>-2</sup>	13,65	45,27	31,62
18	473	4 x10 <sup>-5</sup>	27,50	38,00	10,50
20	473	4 x10 <sup>-3</sup>	13,49	29,39	15,90
9	523	4 x10 <sup>-4</sup>	0,98	12,82	11,84
10	523	4 x10 <sup>-3</sup>	2,13	21,36	19,23
11	523	1,6x10 <sup>-2</sup>	8,44	23,57	15,13
12	573	4 x10 <sup>-5</sup>	0,52	11,26	10,74
13	573	4 x10 <sup>-3</sup>	4,34	15,15	10,81
14	673	4 x10 <sup>-4</sup>	0,26	9,15	8,89
15	673	1,6x10 <sup>-2</sup>	6,45	15,81	9,36
21	773	4 x10 <sup>-5</sup>	0,10	4,20	4,10
17	773	4 x10 <sup>-3</sup>	0,95	9,90	8,95

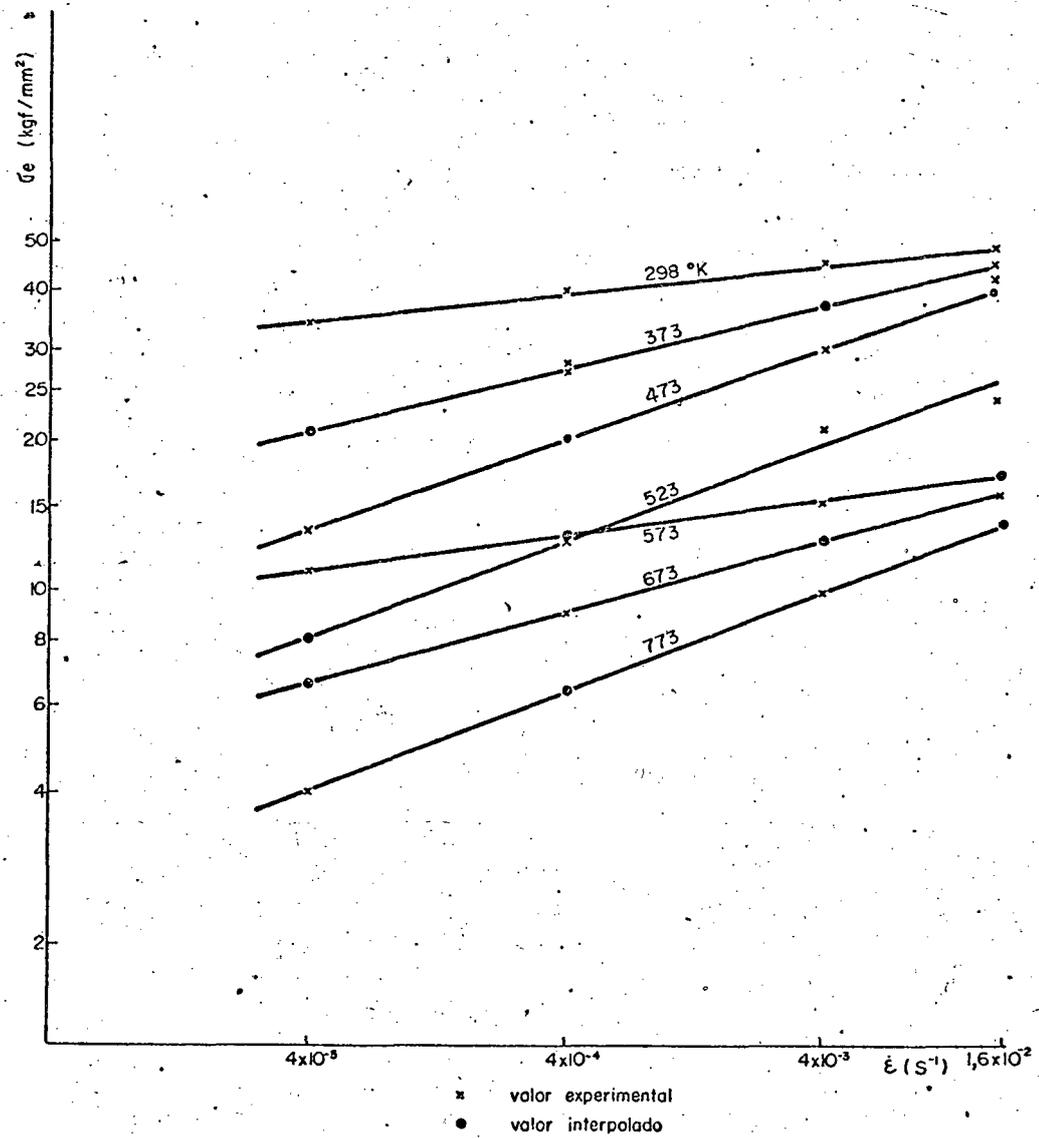
TABELA 22 - Valores das Tensões de Escoamento  
e suas Componentes

T A B E L A 2 3

$$T = 473 \text{ }^{\circ}\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	92,5
10	68,7
20	61
30	55
40	53
50	51,5
60	49,8
70	49,3
80	48,8
90	48,4
100	48
110	47,5
120	47
130	46,5
140	46,1
150	45,8
160	45,5
170	45,3
180	45,18
190	45,08
200	45
210	44,95

TABELA 23 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga



**FIGURA 15** - Variação da tensão de início de escoamento com a velocidade de deformação, para várias temperaturas.

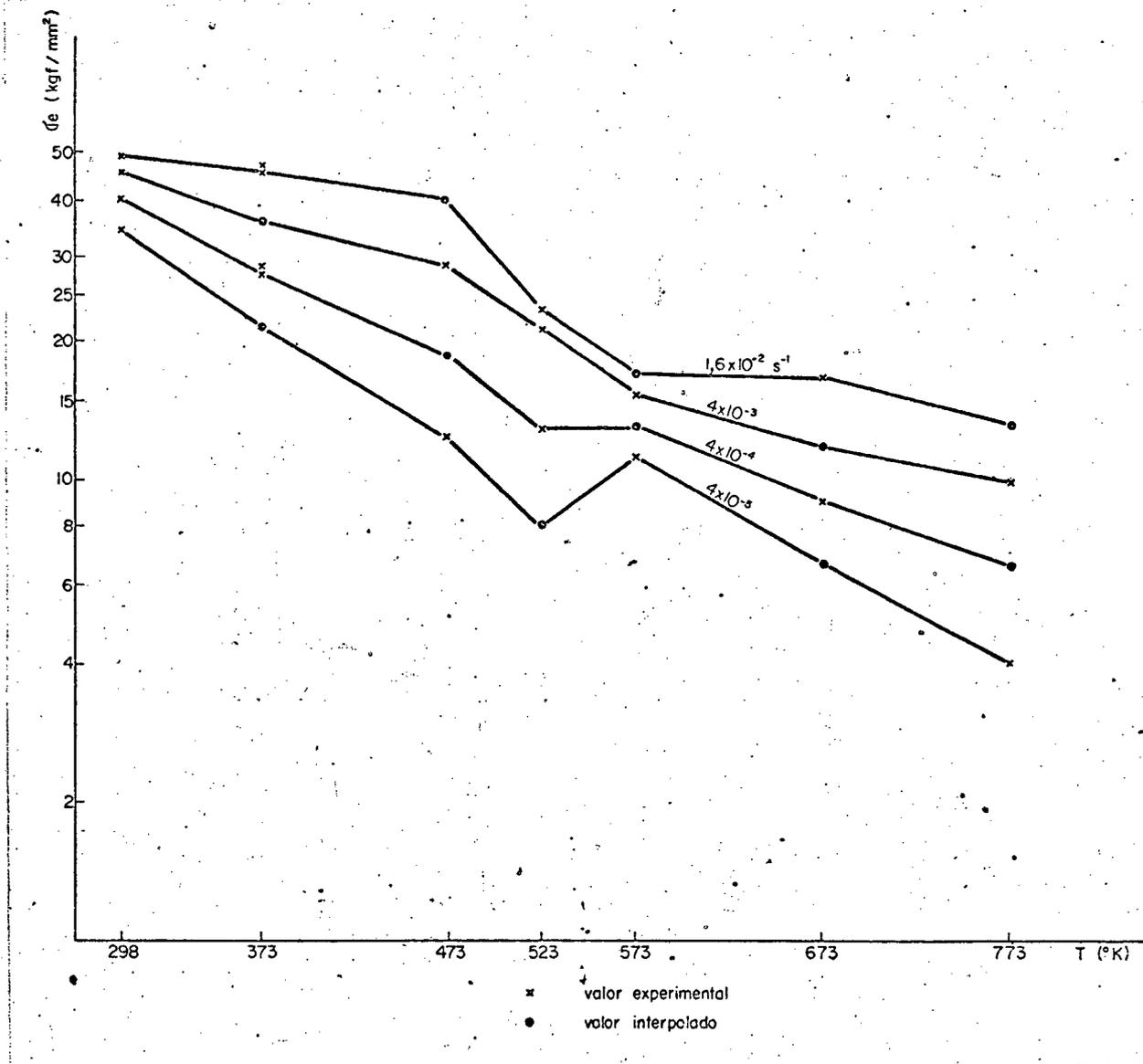


FIGURA 16 - Variação da tensão de início de escoamento com a temperatura, para várias velocidades de deformação.

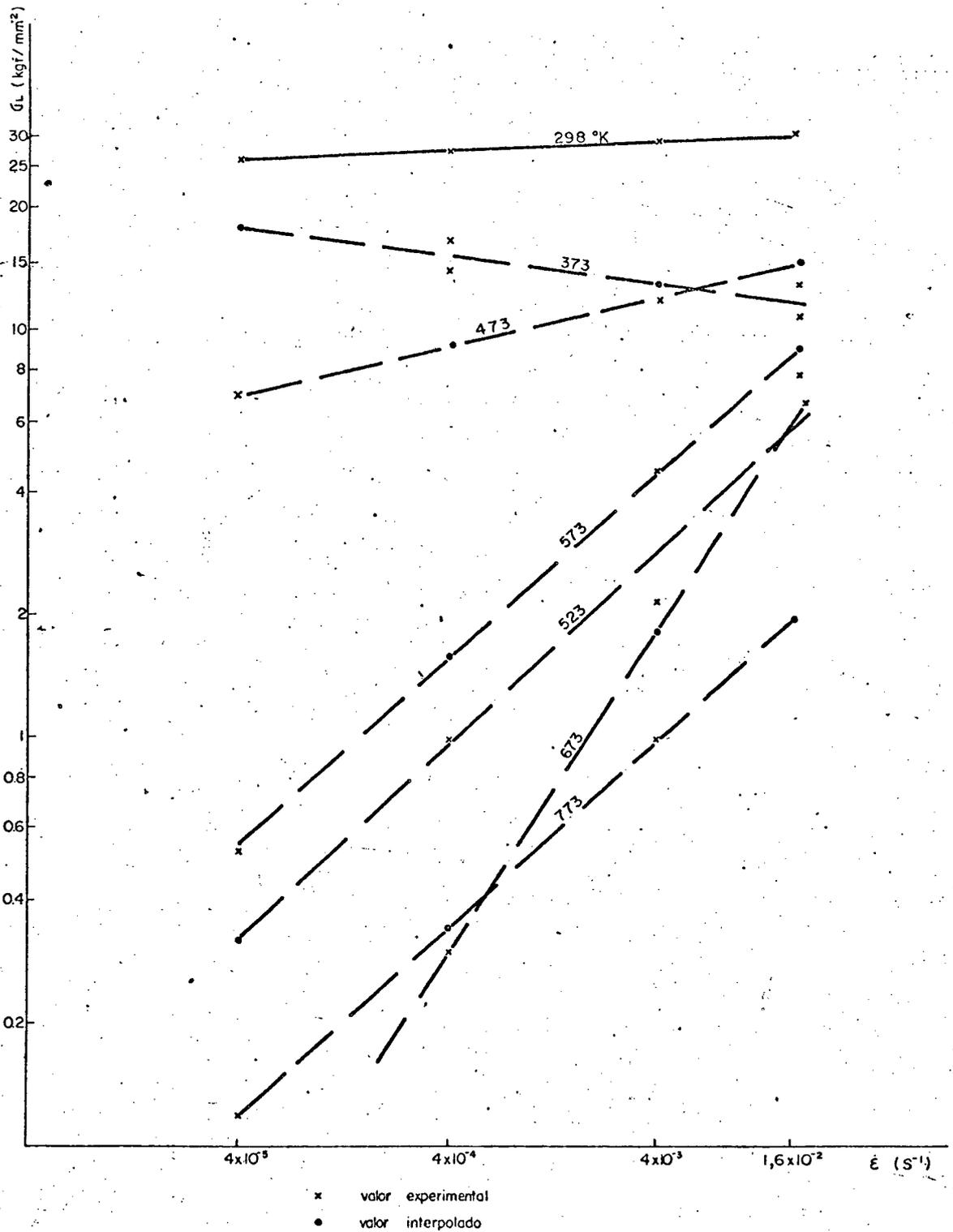


FIGURA 17 - Variação da tensão residual  $\sigma_L$  com a velocidade de deformação, para várias temperaturas.

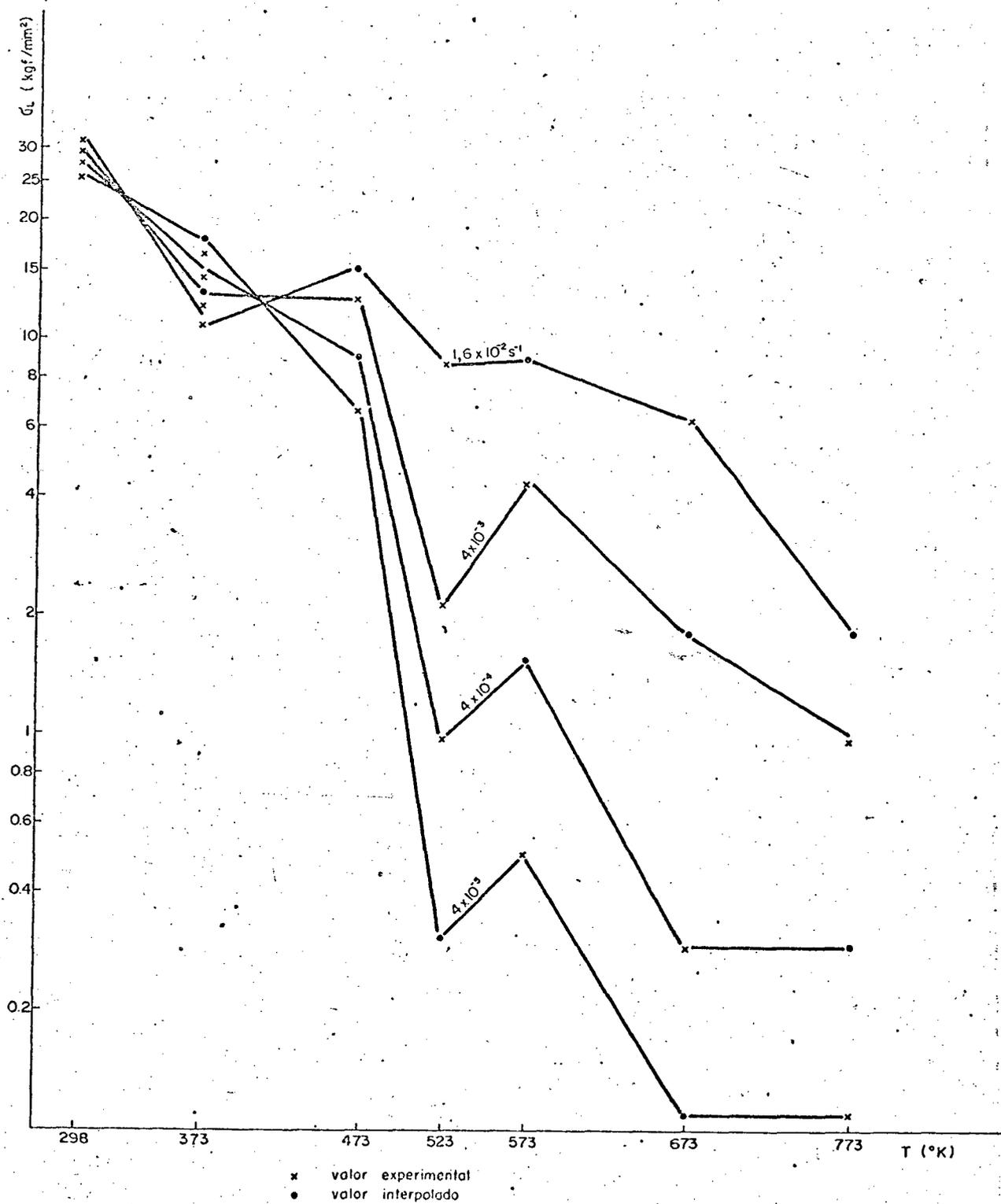


FIGURA 18 - Variação da tensão residual  $\sigma_L$  com a temperatura, para várias velocidades de deformação.

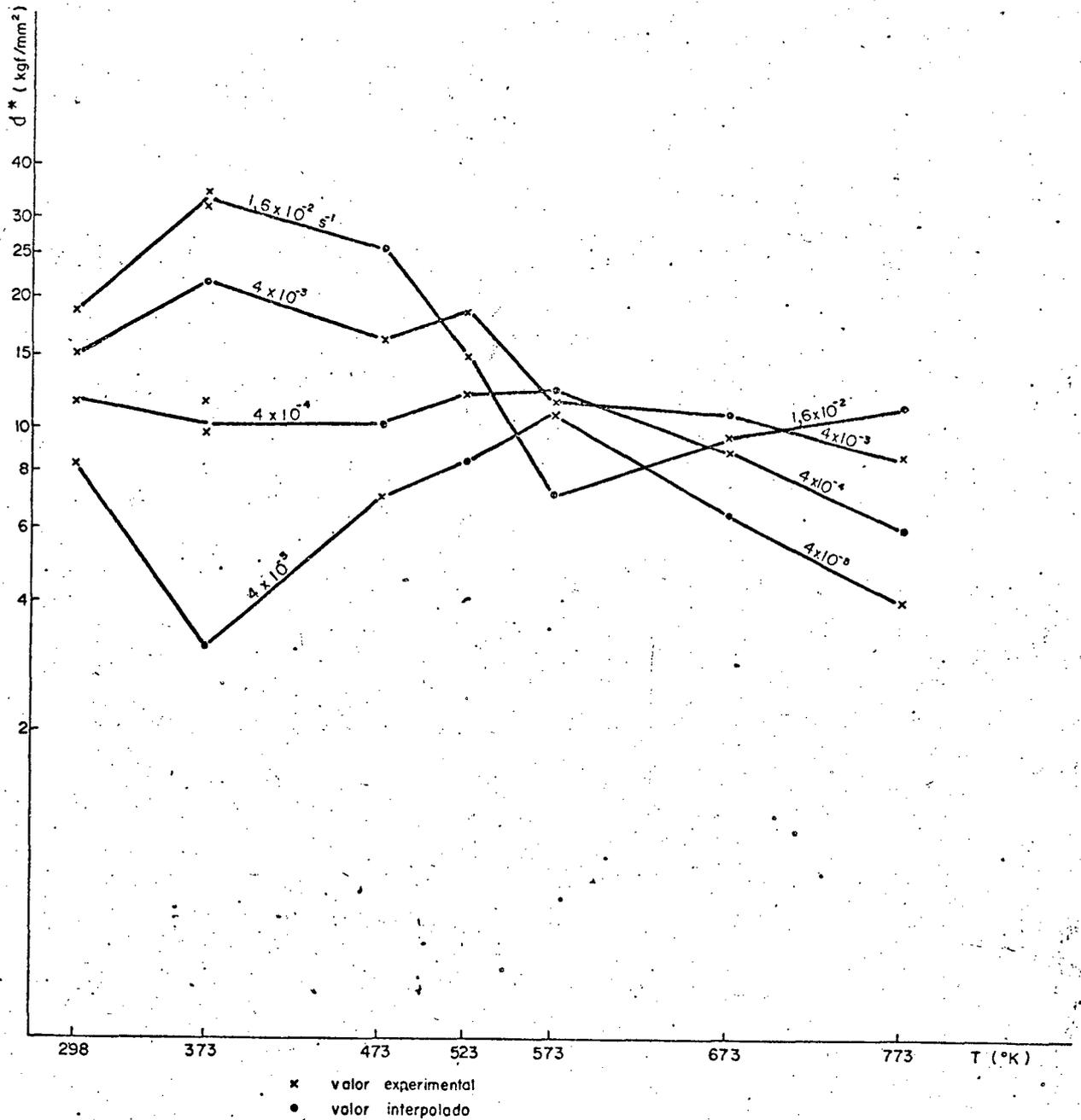


FIGURA 19 - Variação da componente termicamente ativada  $\sigma^*$  com a temperatura, para várias velocidades de deformação.

T A B E L A 24

## RESULTADOS FINAIS

ENSAIO Nº	C. P. Nº	L (mm)	Ø (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_L$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_e$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma^*$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	T (°K)	$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )
23	16	21,05	3,00	7,0686	25,68	33,95	8,27	298	4 x10 <sup>-5</sup>
24	16	21,05	3,00	7,0686	28,00	40,32	12,32	298	4 x10 <sup>-4</sup>
25	16	21,05	3,00	7,0686	29,68	44,70	15,02	298	4 x10 <sup>-3</sup>
26	16	21,05	3,00	7,0686	30,26	48,81	18,55	298	1,6x10 <sup>-2</sup>
x	x	x	x	x	18,00	21,00	3,00	373	4 x10 <sup>-5</sup>
6	4	22,4	3,00	7,0686	16,92	26,88	9,96	373	4 x10 <sup>-4</sup>
x	x	x	x	x	13,69	35,00	21,31	373	4 x10 <sup>-3</sup>
22	14	22	3,00	7,0686	13,65	45,27	31,62	373	1,6x10 <sup>-2</sup>
18	10	20,36	2,96	6,8813	6,37	13,20	6,83	473	4 x10 <sup>-5</sup>
x	x	x	x	x	9,00	19,00	10,00	473	4 x10 <sup>-4</sup>
20	12	22,8	2,98	6,9743	13,49	29,39	15,90	473	4 x10 <sup>-3</sup>
x	x	x	x	x	15,00	40,00	25,00	473	1,6x10 <sup>-2</sup>
x	x	x	x	x	0,33	8,00	7,67	523	4 x10 <sup>-5</sup>
9	6	22,8	2,94	6,7886	0,98	12,82	11,84	523	4 x10 <sup>-4</sup>
10	6	22,8	2,94	6,7886	2,13	21,36	19,23	523	4 x10 <sup>-3</sup>
11	6	22,8	2,94	6,7886	8,44	23,57	15,13	523	1,6x10 <sup>-2</sup>
12	7	22,34	2,97	6,9278	0,52	11,26	10,74	573	4 x10 <sup>-5</sup>
x	x	x	x	x	1,50	13,00	11,50	573	4 x10 <sup>-4</sup>
13	7	22,34	2,97	6,9278	4,34	15,15	10,81	573	4 x10 <sup>-3</sup>
x	x	x	x	x	9,00	16,00	7,00	573	1,6x10 <sup>-2</sup>
x	x	x	x	x	0,10	6,50	6,40	673	4 x10 <sup>-5</sup>
14	8	21,72	3,03	7,2106	0,26	9,15	8,89	673	4 x10 <sup>-4</sup>
x	x	x	x	x	1,80	12,50	10,70	673	4 x10 <sup>-3</sup>
15	8	21,72	3,03	7,2106	6,45	15,81	9,36	673	1,6x10 <sup>-2</sup>
21	13	24,27	2,97	6,9278	0,10	4,20	4,10	773	4 x10 <sup>-5</sup>
x	x	x	x	x	0,27	6,50	6,23	773	4 x10 <sup>-4</sup>
17	9	22,1	3,00	7,0686	0,95	9,90	8,95	773	4 x10 <sup>-3</sup>
x	x	x	x	x	1,90	12,60	10,70	773	1,6x10 <sup>-2</sup>

T A B E L A 25

$$T = 373^{\circ}\text{K}$$

$$\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	190
10	130
20	125
30	123
40	120
50	119
60	115
70	112
80	111
90	110
100	108
110	106
120	105
130	104
140	103
150	102
160	101,5
170	101
180	100,5
190	100,3
200	100,1
210	100

TABELA 25 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

## T A B E L A 26

$$T = 373^{\circ}\text{K}$$

$$\dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

TEMPO (min)	CARGA (kgf)
0	310
10	140
20	135
30	128
40	124
50	118
60	113
70	109
80	104
90	101
100	100
110	95
120	92
130	88
140	84
150	81
160	78
170	76
180	75,5
190	75,3
200	75,1
210	75

TABELA 26 - Ensaio de Relaxação, Tempo x Carga

### 5.1 - Discussão Sobre a Variação da Tensão Residual com a Temperatura

Pelas figuras 17 e 18, fica evidenciada a variação de tensão residual com a temperatura.

Possivelmente, determinados obstáculos ao movimento das discordâncias, considerados de longo alcance a uma determinada temperatura, tornam-se obstáculos de curto alcance em temperaturas mais elevadas.

Possivelmente, quanto maior for a temperatura, menores se tornarão em quantidade os obstáculos de longo alcance.

Apenas nas temperaturas em torno de  $573^{\circ}\text{K}$  (zona anômala) existe uma mudança de mecanismo, devido no entanto, às interações entre discordâncias móveis e átomos solutos.

## 5.2 - Discussão Sobre a Variação da Tensão Residual com a Velocidade de Deformação

Também pela figura 17, observa-se que existe variação da tensão residual com a velocidade de deformação do corpo de prova, em um mesmo nível de temperatura.

Observa-se ainda que, nas maiores temperaturas (acima de 500 °K), esta variação torna-se mais acentuada.

Abordando-se então, alguns aspectos ligados ao fenômeno de relaxação e à influência da velocidade de deformação, ter-se-á mais elementos para uma melhor análise.

Considerando-se um corpo de prova em tração, com uma deformação  $\epsilon$ , tem-se num certo instante

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \epsilon_p \quad (10)$$

onde,  $\epsilon_e$  e  $\epsilon_p$  são as deformações elástica e plástica, respectivamente.

No ensaio de relaxação,  $\epsilon$  permanece constante, à medida que a tensão aplicada  $\sigma$  decresce.

Em outras palavras, ao decréscimo da deformação elástica, corresponde um acréscimo de igual valor da deformação plástica. Quando a tensão aplicada, atinge o mínimo valor  $\sigma_L$  (residual), a deformação elástica toma o valor mínimo  $\sigma_L/E$ . Durante a relaxação, a uma determinada deformação elástica  $\epsilon_e$  corresponde uma determinada tensão  $\sigma$ , dada através de lei de Hooke.

Após um intervalo de tempo  $\Delta t$ , tem-se uma variação de tensão  $\Delta\sigma$ , acompanhada de uma variação de deformação elástica  $\Delta\epsilon_e$ .

Tem-se daí que

$$\dot{\epsilon}_e = \frac{\Delta\sigma}{E \cdot \Delta t} \quad (11)$$

onde,  $\dot{\epsilon}_e$  é a velocidade de deformação elástica.

Os ensaios de relaxação realizados mostram a tendência da carga cair mais rapidamente, quanto maior fôr a velocidade de deformação aplicada. Como a velocidade de deformação elástica durante a relaxação é proporcional à variação da tensão (fórmula 11), tem-se que, às maiores velocidades de ensaios correspondem as maiores velocidades de deformação elástica, durante a relaxação.

Evidentemente,  $\dot{\epsilon}_p$  segue a mesma tendência  $\dot{\epsilon}_e$ .

Quanto ao mecanismo de deformação, Monteiro, Santhanam e Reed-Hill <sup>2</sup> fizeram uma suposição relativa à zona compreendida entre as temperaturas de 500 e 800 °K. Foi proposto que, em baixas velocidades de deformação, discordâncias possuem uma forte tendência de permanecerem presas, possivelmente pela interação com átomos de impurezas intersticiais. Como algumas discordâncias permanecem presas, outras devem ser criadas para manter a deformação.

Porém, as discordâncias que estão fixas, terão a tendência de cessar o movimento das móveis, causando inclusive a inatividade das respectivas fontes, por efeito de "back

stress ".

Novas fontes serão então nucleadas até tornarem-se mais uma vez inoperantes. Segue-se daí, uma elevada densidade total de discordâncias com somente uma pequena fração de discordâncias móveis.

Aumentando-se a velocidade de deformação, diminuiria a tendência das discordâncias manterem-se presas. A densidade total de discordâncias não seria tão elevada e a densidade das discordâncias móveis tenderia a aumentar.

Então, para as menores velocidades de deformação correspondem as maiores tensões aplicadas ao corpo de prova e vice-versa.

No entanto, a figura 17 indica uma tendência contrária nesta faixa de temperaturas, para a componente residual de tensão. Seria interessante então, que outros trabalhos fossem realizados nesta zona de temperaturas, com o mesmo material, tendo por fim encontrar um mecanismo relacionando os efeitos das impurezas com as tensões de longo alcance, numa ampla faixa de velocidades de deformação.

### 5.3 - Verificação Matemática do Método de Li

Segundo Li,  $d\sigma/d \ln t$  varia linearmente com  $\sigma$  em valores de tempo bastante elevados e por conseguinte, a tensão residual pode ser determinada num tempo finito pela simples prolongação da reta até que  $d\sigma/d \ln t$  se anule.

Revisando as expressões relativas ao fenômeno da relaxação, tem-se que:

$$\sigma = \sigma_L + K(t + a)^{-n} \quad (12)$$

onde  $K$  e  $n$  são constantes e  $\sigma$  é a tensão durante a relaxação num instante  $t$ .

Observa-se que  $\sigma$  iguala-se a  $\sigma_L$  para um tempo teoricamente infinito.

Derivando a expressão (12) em relação a  $\ln t$ , obtém-se

$$\frac{d\sigma}{d \ln t} = - \frac{n t}{t + a} (\sigma - \sigma_L) \quad (13)$$

Passando-se a expressão (13) ao limite quando o tempo tende ao infinito, obtém-se

$$\frac{d\sigma}{d \ln t} = - n(\sigma - \sigma_L) \quad (14)$$

A expressão (14) comprova a relação linear entre  $d\sigma/d \ln t$  e  $\sigma$  quando o tempo tende ao infinito e que a tensão alcança o valor residual  $\sigma_L$  quando a derivada se anula.

6 - C O N C L U S Õ E S

- A natureza de  $\sigma_L$  não é atérmica. É preferível a consideração de tensão de longo alcance relacionada com a energia térmica disponível na rede cristalina.

- A tensão residual (componente de longo alcance) varia inversamente com a temperatura, exceto em torno de 573 °K (zona anômala).

- A variação da tensão residual com a velocidade de de formação é pouco significativa entre as temperaturas ambiente e 500 °K, acentuando-se em temperaturas mais elevadas. No entanto tratando-se de zona de temperaturas, onde possivelmente ocorrem mudanças no mecanismo de deformação (500 - 800°K) é preferível antes, executar novos trabalhos nesta faixa, tomando-se para cada ponto  $\sigma_L \times \dot{\epsilon}$ , a média de diversos ensaios e com uma variada gama de velocidades de deformação, para após, se chegar a conclusões mais seguras.

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

- 01 - ORAVA, R.N., STONE, G., CONRAD, N.; Trans. A.S.M.; vol. 58; p. 171; 1966.
- 02 - MONTEIRO, S.N., SANTHANAM, A.T.; REED-HILL, R.E.; The Science, Technology and Application of Titanium; artigo 8; 1969.
- 03 - LI, J.C.M.; Canad. J. Phys.; 45, 493; 1967.
- 04 - EVANS, A.G.; RAWLINGS, R.D.; Phys. Stat. Sol. 34.9; 1969.
- 05 - PARKER, E.R., Brittle Behaviour of Engineering Structures ; 1957.
- 06 - HONDA, R.; Acta Metall.; 9, 969; 1961.
- 07 - SAMUELS, L.E.; Metall. Polishing by Mech. Met.; 1967.
- 08 - QUITES, A.M.; Deform. Plast. Term. Ativada de Ti; 1970.
- 09 - EVANS, K.R.; Trans. A.S.M.; vol. 242; p. 648; 1968.
- 10 - CONRAD, H.; Can. J. Phys. vol. 45; p. 581; 1967.
- 11 - LEVINE, E.D.; Trans. TMS - AIME; vol. 236; p. 1558; 1966.
- 12 - LEE, D.; WOODFORD, D.A.; Strain Rate Dependent Plastic Flow Beh. of Metals; p. 113; 1970.
- 13 - CONRAD, H.; Journal of Metal.; p. 582; 1964.
- 14 - BASINSKI, Z.S.; Austr. J. Phys.; vol. 13; p. 284; 1960
- 15 - CONRAD, H.; WIEDERSICK, H.; Acta Metal.; vol. 8; 1960.
- 16 - MICHALAT, J.T.; Acta Met.; vol. 13; p. 663; 1965.
- 17 - CHURCHMAN, A.T.; Acta Met.; vol. 3; p. 22; 1955.
- 18 - CONRAD, H.; HAYES, W.; Trans. A.S.M.; vol. 56; 1963.

- 19 - QUILLAN, Mc.; Met. of the Rarer Metals; Titan.; 1956.
- 20 - CONRAD, ROBERTSON; Trans. AIME; vol. 209; p.503; 1957.
- 21 - MITCHELL; Progress in Applied Mat. Res.; vol. 6; 1964.
- 22 - HUTCHISON; HONEYCOMBE; Metal Sc. J.; vol. 1; p. 70; 1967.

## A P Ê N D I C E 1

Ensaio de Relaxação Relacionados em Ordem Cronológica

A tabela 1 refere-se aos ensaios de relaxação relacionados em ordem cronológica.

Os ensaios de 1 a 5 serviram apenas para testar o equipamento, não havendo portanto, a preocupação de obedecimento à tabela 2 do texto.

Os ensaios assinalados com asterístico foram realizados normalmente, enquanto os demais foram anulados por motivos em geral causados por encruamento do corpo de prova no ato de colocação na máquina (torção excessiva) e/ou variação excessiva de temperatura em torno do valor desejado.

TABELA 1

ENSAIO Nº	C.P. Nº	TEMPERATURA (°K)	VELOCIDADE DA PONTE (cm/min)
E - 1	1	373	0,01
E - 2	1	373	0,005
E - 3	3	373	0,005
E - 4	4	573	0,005
E - 5	4	373	0,005
E - 6*	4	373	0,05
E - 7	4	373	2
E - 8	5	373	2
E - 9*	6	523	0,05
E - 10*	6	523	0,5
E - 11*	6	523	2
E - 12*	7	573	0,005
E - 13*	7	573	0,5
E - 14*	8	673	0,05
E - 15*	8	673	2
E - 16	9	773	0,005
E - 17*	9	773	0,5
E - 18*	10	473	0,005
E - 19	11	473	0,5
E - 20*	12	473	0,5
E - 21*	13	773	0,005
E - 22*	14	373	2
E - 23*	16	298	0,005
E - 24*	16	298	0,05
E - 25*	16	298	0,5
E - 26*	16	298	2

TABELA 1 - Ensaios de Relaxação Relacionados  
em Ordem Cronológica

## A P Ê N D I C E 2

Curvas de Relaxação Fornecidas pela Instron para 5 Ensaios

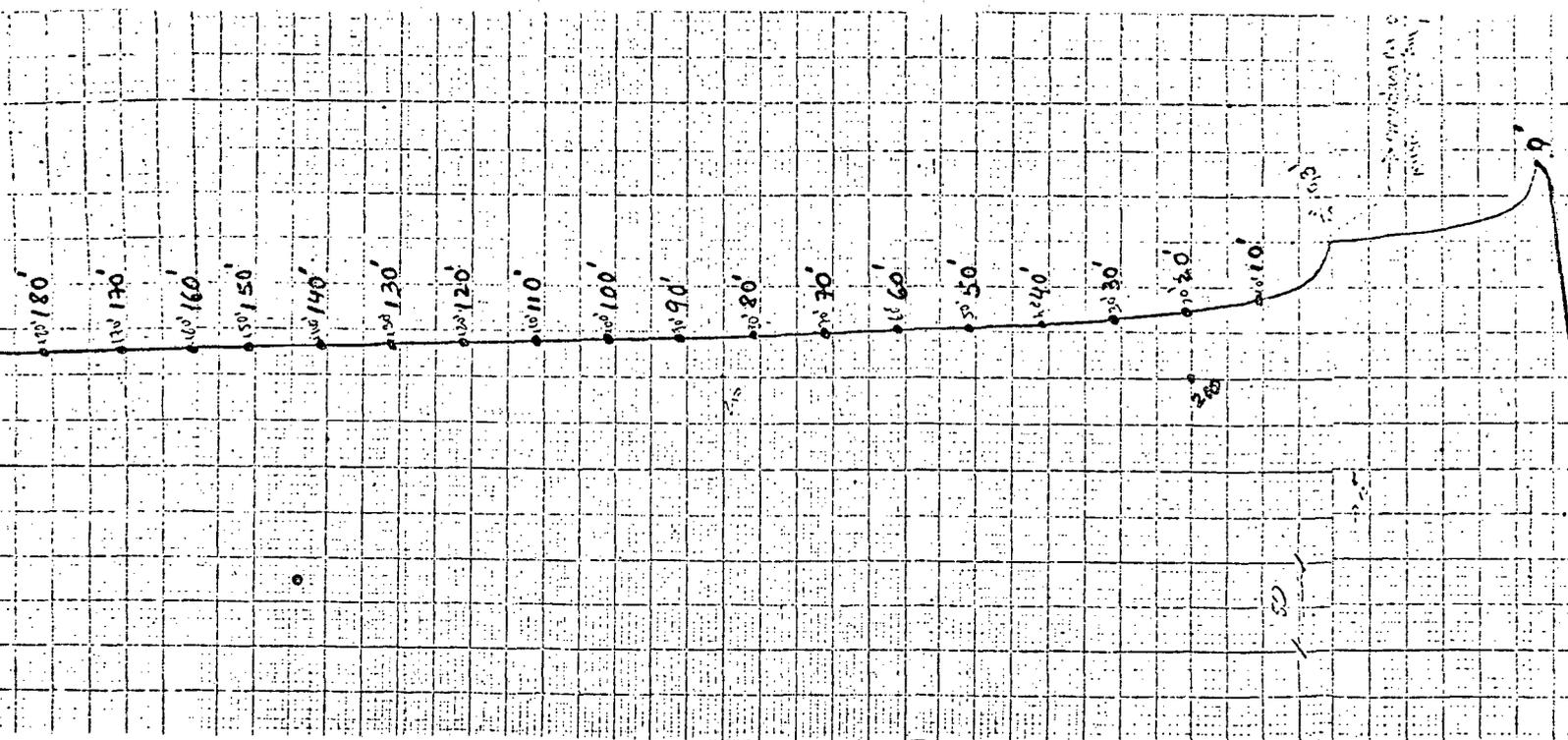


FIGURA 1 - Ensaio de Relaxação

$T = 298 \text{ } ^\circ\text{K}$      $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

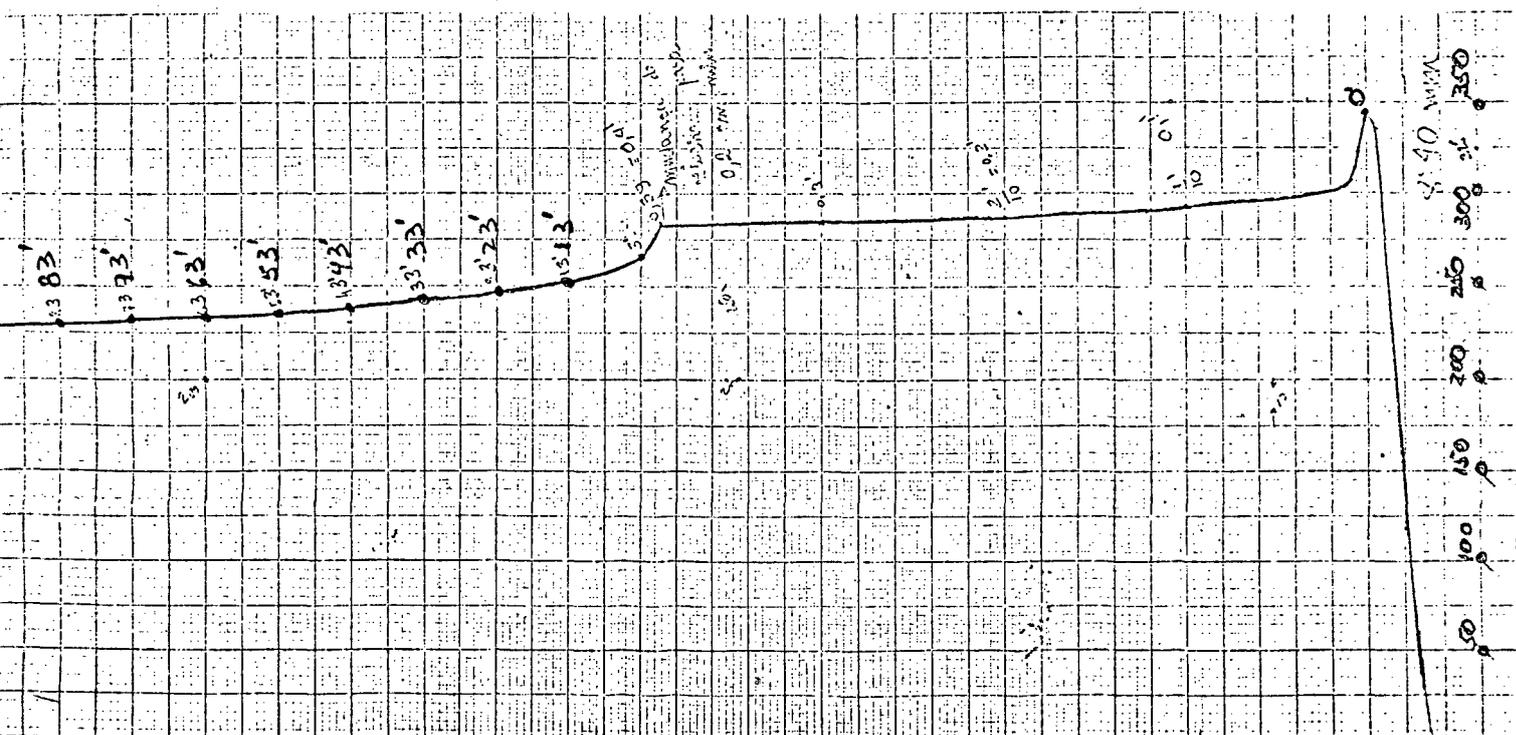


FIGURA 2 - Ensaio de relaxação

$T = 298 \text{ }^{\circ}\text{K} \quad \dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

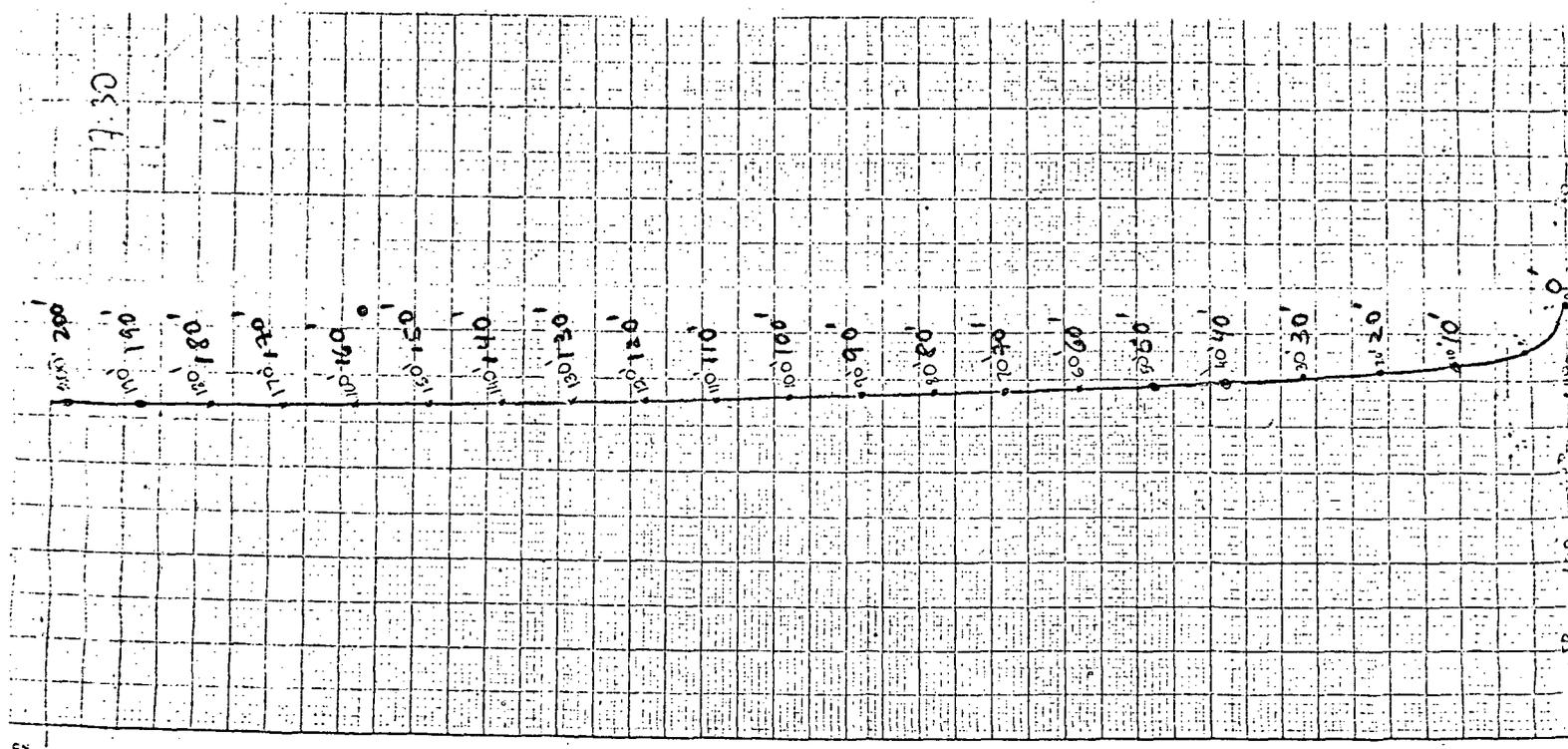


FIGURA 3 - Ensaio de Relaxação

$T = 298^{\circ}\text{K}$   $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$

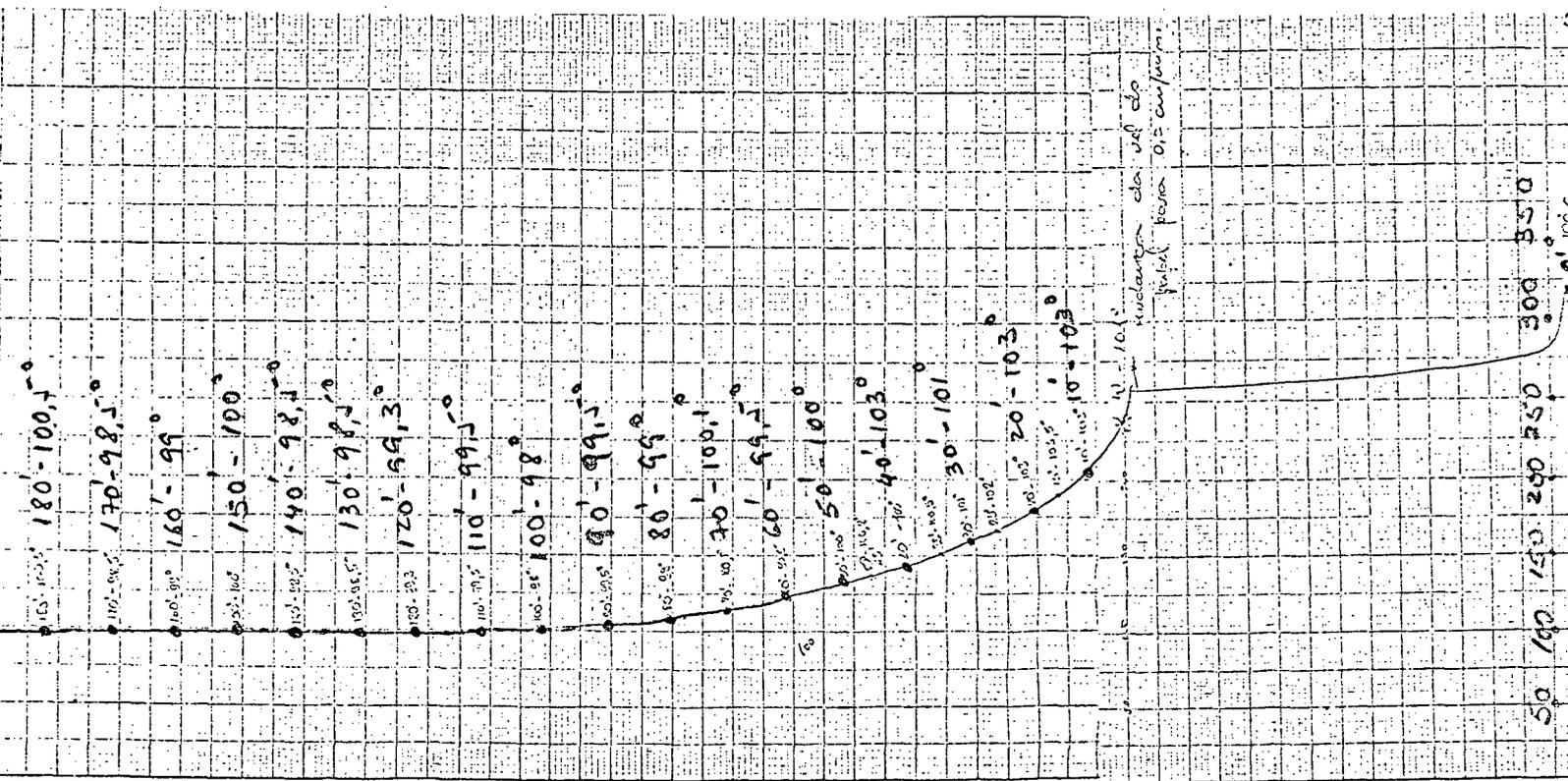


FIGURA 4: - Ensaio de relaxação

$T = 373 \text{ } ^\circ\text{K}$      $\dot{\epsilon} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

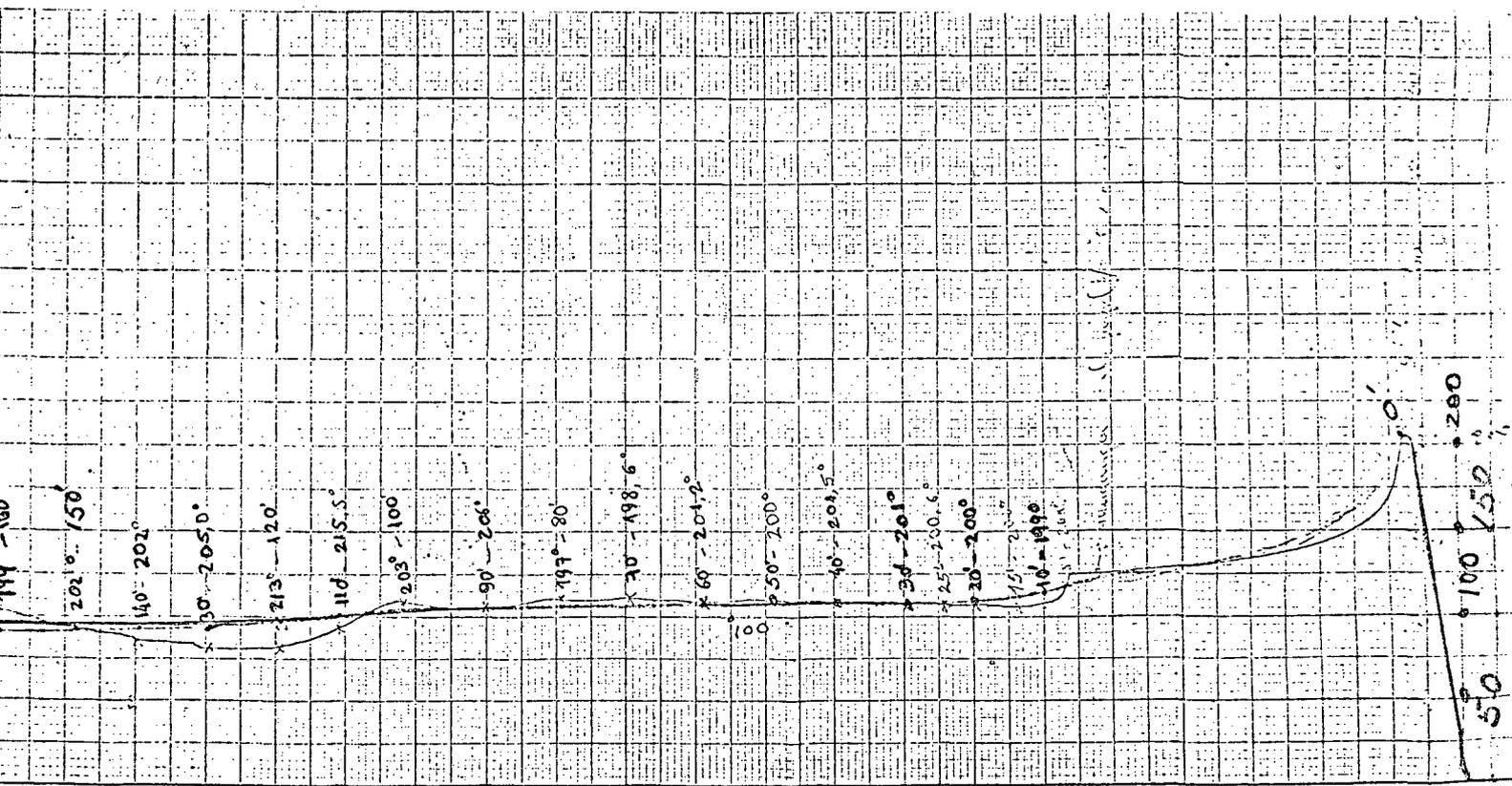


FIGURA 5 - Ensaio de relaxação  
 $T = 473 \text{ }^{\circ}\text{K}$      $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

## A P Ê N D I C E 3

Respostas do Computador para 3 Ensaio

## TABELA 2

ENSAIO Nº 6

INTERPOLAÇÕES E VALORES DAS TANGENTES

TEMPO (MIN)	LOG TEMPO	CARGA (KG)	TANGENTE (DQ/DLT)
0.00	0.00000	190.00	-16.15818
2.00	0.69314	178.80	-16.45818
4.00	1.38629	167.60	-20.38935
6.00	1.79175	156.40	-32.31636
8.00	2.07944	145.20	-43.85058
10.00	2.30258	134.00	-29.11585
12.00	2.48490	133.80	-1.18810
14.00	2.63905	133.60	-1.38042
16.00	2.77258	133.40	-1.59163
18.00	2.89037	133.20	-1.79236
20.00	2.99573	133.00	-1.99231
22.00	3.09104	132.80	-2.19392
24.00	3.17805	132.60	-2.39442
26.00	3.25809	132.40	-2.59486
28.00	3.33220	132.20	-2.79523
30.00	3.40119	132.00	-2.99555
32.00	3.46573	131.80	-3.19582
34.00	3.52636	131.60	-3.39607
36.00	3.58351	131.40	-3.59629
38.00	3.63758	131.20	-3.79648
40.00	3.68887	131.00	-3.99666
42.00	3.73766	130.80	-4.19682
44.00	3.78418	130.60	-4.39696
46.00	3.82864	130.40	-4.59709
48.00	3.87120	130.20	-4.79722
50.00	3.91202	130.00	-4.99733
52.00	3.95124	129.80	-5.19743
54.00	3.98898	129.60	-5.39752
56.00	4.02535	129.40	-5.59761
58.00	4.06044	129.20	-5.79770
60.00	4.09434	129.00	-5.99777
62.00	4.12713	128.80	-6.19784
64.00	4.15888	128.60	-6.39791
66.00	4.18965	128.40	-6.59797
68.00	4.21950	128.20	-6.79804
70.00	4.24849	128.00	-6.99809
72.00	4.27666	127.80	-7.19814
74.00	4.30406	127.60	-7.39819
76.00	4.33073	127.40	-7.59824
78.00	4.35670	127.20	-7.79829
80.00	4.38202	127.00	-7.99833
82.00	4.40671	126.80	-8.19837
84.00	4.43081	126.60	-8.39841
86.00	4.45434	126.40	-8.59844
88.00	4.47733	126.20	-8.79848
90.00	4.49980	126.00	-8.99851
92.00	4.52178	125.80	-9.19854
94.00	4.54329	125.60	-9.39858
96.00	4.56434	125.40	-9.59861

(continuação)

92.00	4.58496	125.20	-9.79803
100.00	4.60517	125.00	-9.99800
102.00	4.62497	124.60	-10.19889
104.00	4.64435	124.60	-10.29871
106.00	4.66243	124.40	-10.59874
108.00	4.68213	124.20	-10.79876
110.00	4.70048	124.00	-10.99878
112.00	4.71849	123.80	-11.19880
114.00	4.73619	123.60	-11.39882
116.00	4.75359	123.40	-11.59884
118.00	4.77068	123.20	-11.79887
120.00	4.78749	123.00	-11.99889
122.00	4.80402	122.80	-12.19890
124.00	4.82028	122.60	-12.39892
126.00	4.83628	122.40	-12.59894
128.00	4.85203	122.20	-12.79896
130.00	4.86753	122.00	-9.74923
132.00	4.88280	121.90	-6.59949
134.00	4.89783	121.80	-6.69950
136.00	4.91265	121.70	-6.79950
138.00	4.92725	121.60	-6.89951
140.00	4.94164	121.50	-6.99952
142.00	4.95582	121.40	-7.09953
144.00	4.96981	121.30	-7.19953
146.00	4.98360	121.20	-7.29954
148.00	4.99721	121.10	-7.39955
150.00	5.01063	121.00	-6.74960
152.00	5.02388	120.92	-6.07964
154.00	5.03695	120.84	-6.19965
156.00	5.04985	120.76	-6.29965
158.00	5.06259	120.68	-6.31966
160.00	5.07517	120.60	-5.59971
162.00	5.08759	120.54	-4.89975
164.00	5.09986	120.48	-4.91975
166.00	5.11198	120.42	-4.97975
168.00	5.12396	120.36	-5.03976
170.00	5.13579	120.30	-4.24980
172.00	5.14749	120.26	-3.43984
174.00	5.15905	120.22	-3.47984
176.00	5.17048	120.18	-3.51984
178.00	5.18178	120.14	-3.55985
180.00	5.19295	120.10	-2.69988
182.00	5.20400	120.08	-1.81992
184.00	5.21493	120.06	-1.83992
186.00	5.22574	120.04	-1.85992
188.00	5.23644	120.02	-1.87993
190.00	5.24702	120.00	-1.89993
192.00	5.25745	119.98	-1.91992
194.00	5.26785	119.96	-1.93992
196.00	5.27811	119.94	-1.95993
198.00	5.28826	119.92	-1.97992
200.00	5.29831	119.90	-1.99992

## TABELA 3

ENSAIO Nº 21

## INTERPOLAÇÕES E VALORES DAS TANGENTES

TEMPO (MIN)	LOG TEMPO	CARGA (KG)	TANGENTE (DQ/DLT)
0.00	0.00000	143.00	-9.52178
2.00	0.69314	136.40	-9.52178
4.00	1.38629	129.80	-12.01515
6.00	1.79175	123.20	-19.04857
8.00	2.07944	116.60	-25.84052
10.00	2.30258	110.00	-26.16281
12.00	2.48490	106.00	-23.77610
14.00	2.63905	102.00	-27.80847
16.00	2.77258	98.00	-31.83263
18.00	2.89037	94.00	-35.85136
20.00	2.99573	90.00	-34.86302
22.00	3.09104	87.00	-32.90888
24.00	3.17805	84.00	-35.91651
26.00	3.25809	81.00	-38.92295
28.00	3.33220	78.00	-41.92847
30.00	3.40119	75.00	-37.44437
32.00	3.46573	73.00	-31.95829
34.00	3.52636	71.00	-33.96074
36.00	3.58351	69.00	-35.96293
38.00	3.63758	67.00	-37.96488
40.00	3.68887	65.00	-39.96696
42.00	3.73766	61.00	-33.93646
44.00	3.78418	57.00	-37.93935
46.00	3.82864	53.00	-39.94200
48.00	3.87120	49.00	-35.94441
50.00	3.91202	45.00	-37.94998
52.00	3.95124	43.00	-31.97434
54.00	3.98898	41.00	-33.97530
56.00	4.02535	39.00	-35.97618
58.00	4.06044	37.00	-37.97700
60.00	4.09434	35.00	-31.97332
62.00	4.12713	32.20	-33.96988
64.00	4.15888	29.40	-35.97082
66.00	4.18965	26.60	-37.97171
68.00	4.21950	23.80	-39.97254
70.00	4.24849	21.00	-33.968123
72.00	4.27666	19.86	-35.96947
74.00	4.30406	18.72	-37.97072
76.00	4.33073	17.58	-39.97100
78.00	4.35670	16.44	-33.96525
80.00	4.38202	15.30	-35.96674
82.00	4.40671	15.18	-37.96802
84.00	4.43081	15.06	-39.96904
86.00	4.45434	14.94	-33.96306
88.00	4.47733	14.82	-35.96409
90.00	4.49980	14.70	-37.96518
92.00	4.52178	14.60	-39.96627
94.00	4.54329	14.50	-33.96129
96.00	4.56434	14.40	-35.96230

(continuação)

98.00	4.58496	14.30	-4.89931
100.00	4.60517	14.20	-4.99933
102.00	4.62497	14.10	-5.09934
104.00	4.64439	14.00	-5.19935
106.00	4.66343	13.90	-5.29937
108.00	4.68213	13.80	-5.39938
110.00	4.70048	13.70	-4.89940
112.00	4.71849	13.62	-4.47952
114.00	4.73619	13.54	-4.58953
116.00	4.75359	13.46	-4.68955
118.00	4.77068	13.38	-4.71956
120.00	4.78749	13.30	-4.79958
122.00	4.80432	13.22	-4.87959
124.00	4.82028	13.14	-4.98960
126.00	4.83628	13.06	-5.08961
128.00	4.85203	12.98	-5.11962
130.00	4.86753	12.90	-5.18963
132.00	4.88280	12.82	-5.27964
134.00	4.89783	12.74	-5.35965
136.00	4.91265	12.66	-5.43966
138.00	4.92725	12.58	-5.51967
140.00	4.94164	12.50	-5.59968
142.00	4.95582	12.42	-5.67969
144.00	4.96981	12.34	-5.75970
146.00	4.98360	12.26	-5.83971
148.00	4.99721	12.18	-5.91972
150.00	5.01063	12.10	-5.24973
152.00	5.02385	12.04	-4.58974
154.00	5.03695	11.98	-4.61974
156.00	5.04985	11.92	-4.57974
158.00	5.06259	11.86	-4.73974
160.00	5.07517	11.80	-4.79974
162.00	5.08759	11.74	-4.85975
164.00	5.09986	11.68	-4.91975
166.00	5.11198	11.62	-4.97975
168.00	5.12396	11.56	-5.03976
170.00	5.13579	11.50	-4.24976
172.00	5.14749	11.46	-3.43977
174.00	5.15905	11.42	-3.47977
176.00	5.17048	11.38	-3.51977
178.00	5.18178	11.34	-3.55978
180.00	5.19295	11.30	-3.59978
182.00	5.20400	11.26	-3.63978
184.00	5.21493	11.22	-3.67978
186.00	5.22574	11.18	-3.71978
188.00	5.22644	11.14	-3.75978
190.00	5.24702	11.10	-2.84979
192.00	5.25749	11.06	-1.91979
194.00	5.26785	11.06	-1.92979
196.00	5.27811	11.04	-1.95979
198.00	5.28826	11.02	-1.97979
200.00	5.29831	11.00	-1.98979

## TABELA 4

ENSAIO Nº 22

INTERPOLAÇÕES E VALORES DAS TANGENTES

TEMPO (MIN)	LOG TEMPO	CARGA (KG)	TANGENTE (DQ/PLT)
0.00	0.00000	320.00	-33.18198
2.00	0.69314	297.00	-33.18198
4.00	1.38629	274.00	-41.87100
6.00	1.79175	251.00	-63.30397
8.00	2.07944	228.00	-90.05029
10.00	2.30258	205.00	-69.05049
12.00	2.48490	230.00	-29.72012
14.00	2.63905	195.00	-34.76059
16.00	2.77258	190.00	-39.79079
18.00	2.89037	165.00	-44.81420
20.00	2.99579	180.00	-44.84959
22.00	3.09104	176.00	-43.87851
24.00	3.17805	172.00	-47.88869
26.00	3.25809	168.00	-51.89727
28.00	3.33220	164.00	-55.90463
30.00	3.40119	160.00	-59.91769
32.00	3.46573	156.00	-54.92909
34.00	3.52626	152.00	-57.73327
36.00	3.58351	149.00	-61.13698
38.00	3.63758	146.00	-64.54030
40.00	3.68887	143.00	-59.95330
42.00	3.73766	140.00	-46.16805
44.00	3.78418	138.00	-48.36664
46.00	3.82864	136.00	-50.56809
48.00	3.87120	134.00	-52.76943
50.00	3.91202	132.00	-49.97332
52.00	3.95124	130.00	-46.77691
54.00	3.98898	128.00	-48.57777
56.00	4.02535	126.00	-50.37856
58.00	4.06044	124.00	-52.17930
60.00	4.09434	122.00	-50.98110
62.00	4.12713	121.00	-49.58279
64.00	4.15898	119.00	-51.18333
66.00	4.18965	118.00	-52.78382
68.00	4.21950	116.00	-54.38431
70.00	4.24849	116.00	-45.48761
72.00	4.27666	114.00	-35.99072
74.00	4.30406	112.00	-36.99099
76.00	4.33073	112.00	-37.99122
78.00	4.35670	111.00	-38.99145
80.00	4.38202	110.00	-31.99333
82.00	4.40671	109.00	-24.99512
84.00	4.43081	108.00	-25.19923
86.00	4.45434	108.00	-25.79934
88.00	4.47733	107.00	-26.39945
90.00	4.49980	107.00	-26.99955
92.00	4.52178	106.00	-27.59966
94.00	4.54329	105.00	-28.19974

(continuação)

96.00	4.56424	105.20	-28.79583
98.00	4.58496	104.60	-29.39591
100.00	4.60517	104.00	-19.59731
102.00	4.62497	103.80	-10.19869
104.00	4.64439	103.60	-10.39871
106.00	4.66343	102.40	-10.59874
108.00	4.68213	103.20	-13.79876
110.00	4.70045	103.00	-10.99878
112.00	4.71849	102.80	-11.19880
114.00	4.73619	102.60	-11.39882
116.00	4.75359	102.40	-11.59884
118.00	4.77068	102.20	-11.79887
120.00	4.78749	102.00	-11.99889
122.00	4.80402	101.80	-12.19890
124.00	4.82028	101.60	-12.39892
126.00	4.83628	101.40	-12.59894
128.00	4.85203	101.20	-12.79896
130.00	4.86753	101.00	-12.99897
132.00	4.88280	100.80	-13.19898
134.00	4.89783	100.60	-13.39899
136.00	4.91265	100.40	-13.59901
138.00	4.92725	100.20	-13.79903
140.00	4.94164	100.00	-13.99904
142.00	4.95582	99.90	-7.39905
144.00	4.96981	99.80	-7.19905
146.00	4.98360	99.70	-7.29905
148.00	4.99721	99.60	-7.39905
150.00	5.01063	99.50	-7.49905
152.00	5.02388	99.40	-7.59905
154.00	5.03695	99.30	-7.69905
156.00	5.04985	99.20	-7.79905
158.00	5.06259	99.10	-7.89905
160.00	5.07517	99.00	-7.19906
162.00	5.08759	98.92	-6.47907
164.00	5.09986	98.84	-6.55907
166.00	5.11198	98.76	-6.63908
168.00	5.12396	98.68	-6.71908
170.00	5.13579	98.60	-6.79908
172.00	5.14749	98.52	-6.87908
174.00	5.15905	98.44	-6.95909
176.00	5.17048	98.36	-7.03909
178.00	5.18179	98.28	-7.11910
180.00	5.19295	98.20	-6.29910
182.00	5.20400	98.14	-5.47911
184.00	5.21493	98.08	-5.55911
186.00	5.22574	98.02	-5.63912
188.00	5.23644	97.96	-5.71912
190.00	5.24702	97.90	-4.79912
192.00	5.25749	97.86	-3.87913
194.00	5.26785	97.82	-3.95913
196.00	5.27811	97.78	-3.91913
198.00	5.28826	97.74	-3.91913
200.00	5.29831	97.70	-2.91913
202.00	5.30826	97.68	-2.01913
204.00	5.31811	97.66	-2.03913
206.00	5.32787	97.64	-2.03913
208.00	5.33752	97.62	-2.07913
210.00	5.34710	97.60	-2.08913

## A P Ê N D I C E 4

Listagem do Programa de Computador

Interpolação Linear de Cargas e Cálculo de Tangentes  $\frac{dq}{d \ln t}$

PROGRAMA DE INTERPOLAÇÃO LINEAR DE CARGAS  
E CÁLCULO DE TANGENTES  $dQ/d\ln t$

PAGE 1

// JOB

LOG DRIVE    CART SPEC    CART AVAIL    PHY DRIVE  
0000            0002            0002            0000

V2 M11    ACTUAL 16K    CONFIS 16K

// FOR

\*IOCS(CARD,1132PRINTER)

\*LIST SOURCE PROGRAM

\*ARITHMETIC TRACE

\*TRANSFER TRACE

\*EXTENDED PRECISION

INTEGER VG

REAL LOGT(150),LO,IT,KAST

INTEGER TEMP(5),DATA(7),FAIXA(11),P(150),CBS(30)

DIMENSION MAC(8),MAT(20),PT(100),TL(100),GL(100),

\*G(150),T(150),DODLI(150),NONE(7)

DATA KAST/'\*\*\*\*\*'/

VC=KAST

999 READ(2,1)NONE,LO,SO

1 FORMAT(7A1,2X,2(F10.7))

IF(LO)2,1000,2

2 READ(2,3)MAC,MAT,TEMP,DATA,FAIXA

3 FORMAT(8A1,20A1,5A1,7A1,11A1)

READ(2,30)CBS.

30 FORMAT(30A1)

C

C

C

I=1

31 READ(2,4)PT(I),TL(I),GL(I)

4 FORMAT(3F10.5)

IF(PT(I))41,42,41

41 I=I+1

GO TO 31

42 N=I-1

C

C

C

IMPRESSAO DE TITULOS E DADOS BASICOS

WRITE(3,110)

110 FORMAT('11')

```

63 IF(TT-120.)64,64,65
64 IT=1.0
   GO TO 66
65 IT=2.0
66 L=1
   MULT=1
   NP2=N-1
   DO 10 J=1, NP2
   IF(J-1)7,70,7
70 T(L)=TL(J)
   LOGT(L)=0.0
   Q(L)=QL(J)
   P(L)=L
7 TS = T(L)
   L=L+1
   DELTA= (QL(J)-QL(J+1 ))/(TL(J+1)-TL (J))
8 TI=TS+FLOAT(MULT)*IT
   IF(TI-TL(J+1))71,71,9
71 T(L)=TI
   LOGT(L)=ALOG(T(L))
   C(L)=QL(J)-ABS(DELTA)*(TI-TL (J))
   P(L)=L
   MULT=MULT+1
   L=L+1
   GO TO 8
9 IF(J-NP2)72,101,72
72 MULT=1
   L=L-1
10 CONTINUE

```

C  
C     CALCULO DAS TANGENTES DQ/DLOGT

C



```

101 IK= IFIX( TL( ) / IT ) + 1
    IF ( LOGT( 2 ) - LOGT( 1 ) ) 33, 55, 33
32 DCDLT( 1 ) = ( Q( 2 ) - Q( 1 ) ) / ( LOGT( 2 ) - LOGT( 1 ) )
    GO TO 555
55 DCDLT( 1 ) = 99.99999
555 DCDLT( IK ) = ( Q( IK ) - Q( IK - 1 ) ) / ( LOGT( IK ) - LOGT( IK - 1 ) )
    IJ = IK - 1
    DO 11 IL = 2, IJ
    IF ( LOGT( IL - 1 ) - LOGT( IL - 1 ) ) 84, 88, 88
88 DCDLT( IL ) = 99.99999
    GO TO 11
88 DCDLT( IL ) = ( Q( IL + 1 ) - Q( IL - 1 ) ) / ( LOGT( IL + 1 ) - LOGT( IL - 1 ) )
11 CONTINUE
    DO 171 KK = 1, IK
    WRITE( 3, 17 ) P( KK ), T( KK ), LOGT( KK ), Q( KK ), DCDLT( KK )
17 FORMAT( 24X, I5, 12X, F7.2, 11X, F10.5, 12X, F7.2, 12X, F12.5 )
171 CONTINUE
    GO TO 999
1000 CALL EXIT
    END

```

## FEATURES SUPPORTED

TRANSFER TRACE  
 ARITHMETIC TRACE  
 EXTENDED PRECISION  
 IOCS

## CORE REQUIREMENTS FOR

COMMON      0    VARIABLES      3630    PROGRAM      1274

END OF COMPILATION