

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTÂNCIA DE CONTATO
ENTRE DUAS SUPERFÍCIES SÓLIDAS PELA TÉCNICA
DE PULSO DE ENERGIA**

Gerson Antonio Rubin

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de "Mestre na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. Joaquim de Sylos Cintra Filho

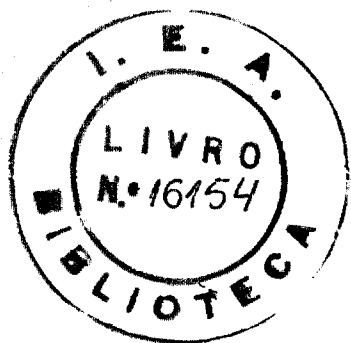
São Paulo
1979

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia
Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDUTÂNCIA DE CONTATO
ENTRE DUAS SUPERFÍCIES SÓLIDAS PELA
TÉCNICA DE PULSO DE ENERGIA**

GERSON ANTONIO RUBIN



Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares para a obtenção do Título de "Mestre na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: *Dr. Joaquim de Sylos Cintra Filho*

São Paulo
1979

*à Inah, minha esposa
e Marcela, nossa filha*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar aqui a minha gratidão à todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e em particular:

Ao Prof. Dr. Joaquim de Sylos Cintra Filho, pela orientação e colaboração durante a execução deste trabalho.

Aos Engs. Gildo José da Silva Costa, José Carlos de Almeida e Alfredo Alejo Gonzales, pela colaboração na montagem experimental e, também, pelas valiosas discussões e sugestões.

Aos Engs. Jorge Khouri, Magno Jorge Zandavalli Barbosa, Reynaldo Turquetti Filho e Silvio Luís Zen, pelas sugestões e contribuições em várias etapas deste trabalho.

Aos demais colegas do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelo constante estímulo.

A minha esposa Inah, pelo estímulo, paciência e compreensão dispensados durante a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e ao PRONUCLEAR - Programa de Formação de Recursos Humanos Para o Setor Nuclear-, pelo fornecimento do material e pelo suporte financeiro, que permitiram a execução deste trabalho.

Gerson Antonio Rubin

RESUMO

Foi desenvolvido um procedimento experimental para determinar o valor da condutância de contato entre duas superfícies sólidas, em função da pressão de contato e da energia do feixe de laser, utilizando-se a Técnica de Pulso de Energia.

Empregou-se, como fonte pulsada de energia radiante, um laser de rubi, com níveis de energia variáveis. O feixe de laser incidiu perpendicularmente à face frontal de amostras-alvo de Ferro Eletrolítico-734.

Os transientes de temperaturas resultantes na face posterior da amostra, detectados por um termopar, foram registrados por um Computador PDP-11/45, com 32 K-bytes de memória, por intermédio de um Conversor Analógico-Digital.

Uma função teórica, desenvolvida exclusivamente para o problema tratado neste trabalho, foi então ajustada por um método de mínimos quadrados à curva de pontos experimentais. Este ajuste forneceu, então, o valor de um parâmetro relacionado com a condutância de contato entre as superfícies.

O erro experimental associado aos valores de condutância de contato obtidos, foi de $\pm 4,9\%$.

ABSTRACT

An experimental procedure for the determination of the thermal contact conductance between two solid surfaces as a function of the contact pressure and the energy of the laser radiation has been developed using the laser pulse method.

A rubi laser with variable energy levels was employed as a radiating pulse energy source. The laser beam was allowed to impinge perpendicularly on the front face of an electrolytic iron 734.

The temperature fluctuations resulting on the back surface of the sample was detected by a thermocouple, which is coupled to a PDP-11/45 Computer 32 Kbytes of memory, through an Analog-Digital Converter.

A theoretical function, derived exclusively for the problem mentioned in this work, was adjusted by a method of least square fitting of experimental results. This adjustment yielded the value of a parameter related to the contact conductance between two surfaces.

The experimental error obtained for the thermal contact conductance was $\pm 4.9\%$.

I N D I C E

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 - Condutância de Contato : Definição 4

1.2 - Objetivos do Trabalho 4

2. CONSIDERAÇÕES FUNDAMENTAIS 6

2.1 - Revisão da Literatura Existente 6

2.1.1 - Condutância Térmica de Contato 6

2.1.2 - Técnica de Pulso de Energia 11

2.2 - Modelo Teórico de PARKER et alli. (1961) ... 12

2.3 - Modelo Teórico Desenvolvido 16

3. MÉTODO EXPERIMENTAL 24

3.1 - Descrição da Técnica de Pulso de Energia .. 24

3.2 - Descrição do Procedimento de Medida Conven-
cional 24

3.3 - Descrição do Procedimento de Medida Utili-
zado 24

3.4 - Arranjo Experimental 25

3.4.1 - Diagrama de Blocos do Arranjo Expe-
rimental 25

3.4.2 - Descrição do Arranjo Experimental . 26

3.5 - Programa Experimental	33
3.5.1 - Experiências Preliminares Para Com- provação do Procedimento Experimen- tal Desenvolvido	33
3.5.2 - Experiências Realizadas Para a De- terminação da Condutância de Conta- to	35
4. RESULTADOS OBTIDOS	38
4.1 - Comparação com a Teoria	51
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	54
5.1 - Conclusões	54
5.2 - Sugestões Para Trabalhos Futuros	55
APÊNDICE A - FORMA E ENERGIA DO FEIXE DE LASER	56
A.1 - Forma dos Pulsos de Laser	56
A.2 - Energia do Feixe de Laser	56
APÊNDICE B - PROGRAMAS "CONDUT" E "AJUST2"	59
APÊNDICE C - ESTIMATIVA DO ERRO EXPERIMENTAL	77

C.1 - Erros Devidos ao Procedimento Experimental Utilizado Para a Detecção do Transiente de Temperatura...	77
C.2 - Erros na Medida da Energia do Feixe de Laser	78
C.3 - Erros Inerentes ao Procedimento de Análise por Mínimos Quadrados ..	78
C.4 - Erros Inerentes ao Cálculo da Pressão de Contato Entre as Pastilhas	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

80

ÍNDICE DAS FIGURAS

Fig. (1.1)	- Barra de Combustível Típica do PWR ...	2
Fig. (1.2)	- Distribuição de Temperaturas no Combustível de um PWR	3
Fig. (2.1)	- Transiente de Temperatura Adimensional Dado Pela Eq. (2.3)	15
Fig. (2.2)	- Diagrama Esquemático da Geometria da Amostra	19
Fig. (3.1a)	- Arranjo Experimental Convencional Para Detecção de Transientes de Temperaturas	27
Fig. (3.1b)	- Arranjo Experimental Utilizado na Determinação da Condutância de Contato	28
Fig. (3.2)	- Diagrama Esquemático do Conjunto Anéis-Pastilhas	30
Fig. (3.3)	- Vista da Mesa-suporte e Sistema de Tração e Fixação da Amostra	32
Fig. (3.4)	- Difusividade Térmica de Ferro de Alta Pureza	37
Fig. (4.1a)	- Transiente de Temperatura Registrado na Tela do Osciloscópio Para Pastilhas de 0,101 cm de Espessura, - Pressão de Contato de 6,7 Kgf/cm ² e Tensão de 1900 VDC	39

Fig.(4.1b)	- Transiente de Temperatura Registrado na Tela do Osciloscópio Para Pastilhas de 0,101 cm de Espessura , - Pressão de Contato de 6,7 Kgf/cm ² e Tensão de 2100 VDC	40
Fig.(4.1c)	- Transiente de Temperatura Registrado na Tela do Osciloscópio Para Pastilhas de 0,101 cm de Espessura , - Pressão de Contato de 6,7 Kgf/cm ² e Tensão de 2300 VDC	41
Fig.(4.2)	- Comparação da Curva Teórica Ajustada com os Correspondentes Pontos Experimentais	47
Fig.(4.3)	- Dependência da Condutância de Contato com a Pressão na Interface - Tensão: 1900 VDC	48
Fig.(4.4)	- Dependência da Condutância de Contato com a Pressão na Interface - Tensão : 2100 VDC	49
Fig.(4.5)	- Dependência da Condutância de Contato com a Pressão na Interface - Tensão : 2300 VDC	50
Fig.(A.1)	- Forma dos Pulsos de Energia	58
Fig.(B.1)	- Diagrama de Blocos Para o Programa " CONDUT "	62
Fig.(B.2)	- Diagrama de Blocos Para o Programa " AJUST2 "	63

ÍNDICE DAS TABELAS

Tab. (4.1)	- Resultados Fornecidos Pelo Programa "AJUST2" Para o 1º Grupo de Experimentos	44
Tab. (4.2)	- Resultados Fornecidos Pelo Programa "AJUST2" Para o 2º Grupo de Experimentos	45
Tab. (4.3)	- Resultados Fornecidos Pelo Programa "AJUST2" Para o 3º Grupo de Experimentos	46
Tab. (4.4)	- Comparação de Resultados Para a Condutância de Contato	53
Tab. (A.1)	- Correspondência Entre a Tensão Fornecida às Lâmpadas-Flash de Xenônio e a Energia do Feixe de Laser	57
Tab. (B.1)	- Equivalência dos Símbolos Utilizados nos Programas FORTRAN	64

1. INTRODUÇÃO

Os reatores tipo PWR (Pressurized Water Reactors), linha adotada pelo Brasil, apresentam sérias limitações com relação à retirada de potência térmica e, conseqüentemente, elétrica. Isto porque os modelos atuais operam à temperaturas bem próximas da temperatura de fusão do material combustível, isto é, do UO_2 .

O elemento de combustível de um reator tipo PWR é constituído de um tubo, confeccionado em zircaloy-4, contendo no seu interior, pastilhas de óxido de urânio (UO_2), enriquecido a 2 - 3%. Uma barra de combustível típica de um PWR é mostrada na Fig.(1.1). As pastilhas de óxido de urânio apresentam altura e diâmetro da ordem de 10 mm. Entre o material combustível e a parede interna do tubo de zircaloy existe uma folga (Vide Fig.(1.2)), geralmente preenchida com gás hélio, cuja finalidade principal é reter produtos de fissão e absorver possíveis expansões do combustível.

O projeto desses elementos combustíveis, todavia, exige o conhecimento das temperaturas a que serão submetidas as barras de combustível e o fluido refrigerante.

O conhecimento destas temperaturas permite projetar corretamente os elementos combustíveis, de

tal forma que, durante sua permanência no núcleo do reator, não sejam ultrapassados os limites de projeto.

Um destes limites estabelece, justamente, a temperatura máxima que se pode atingir no combustível, geralmente, a de fusão do UO_2 . Portanto, é indispensável conhecer, com precisão, a distribuição radial de temperaturas no elemento combustível.

Para se determinar esta distribuição de temperaturas é necessário conhecer a condutância térmica de contato na folga entre a pastilha de óxido de urânio e a superfície interna do tubo de zircaloy.

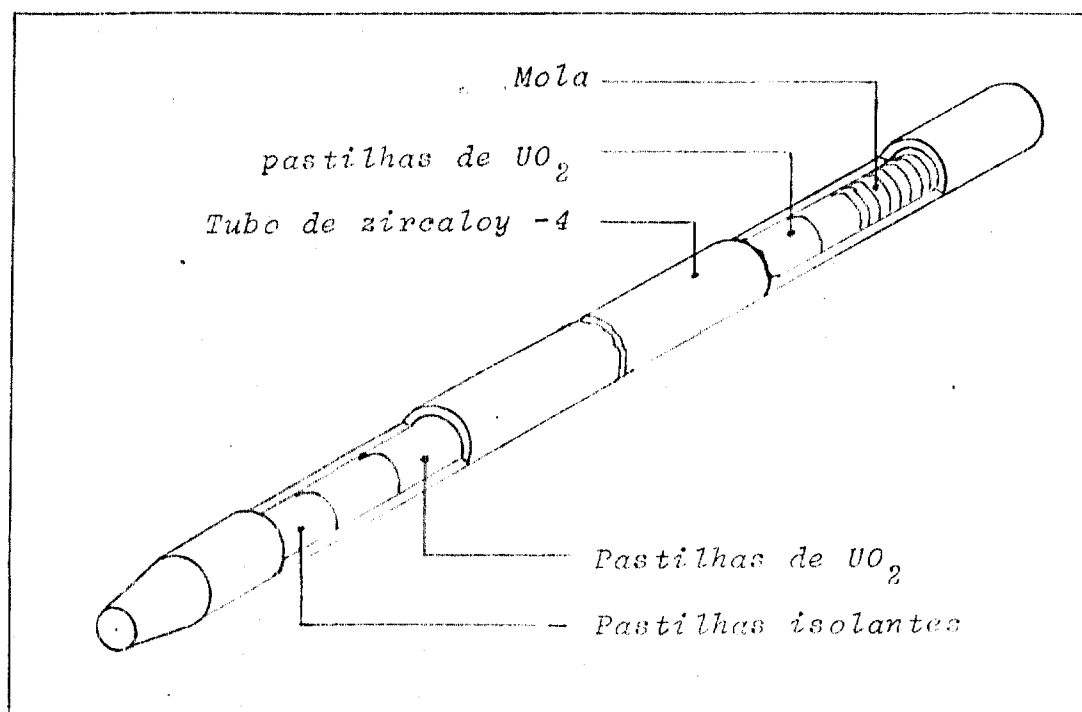


Fig. (1.1) - Barra de Combustível Típica do PWR

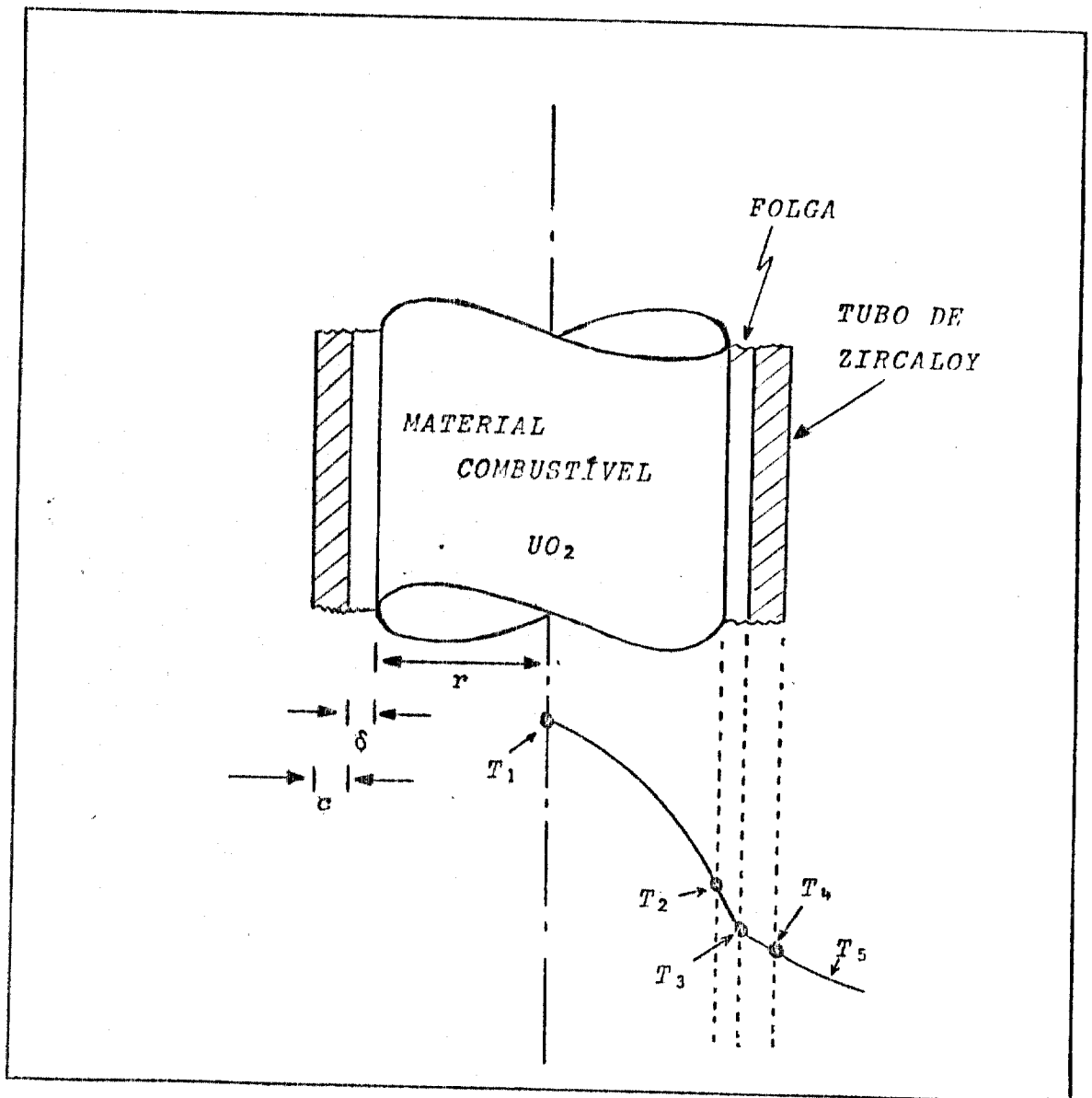


FIG. (1.2) - Distribuição de Temperaturas no Combustível de um PWR

Para a Fig. (1.2), vale a seguinte nomenclatura:

- T_1 temperatura no centro da pastilha de combustível;
- T_2 temperatura na superfície da pastilha;
- T_3 temperatura na superfície interna do tubo de zircaloy;

- . 4 .
- T_4 temperatura na face externa do tubo de zircaloy;
- T_5 temperatura do fluido arrefecedor;
- r raio da pastilha de material combustível;
- c espessura da parede do tubo de zircaloy;
- δ espessura da folga.

1.1 - Condutância de Contato : Definição

A transferência de calor através da interface entre duas superfícies sólidas em contato, pode ser convenientemente descrita por um coeficiente de troca de calor h . Este coeficiente, denominado condutância térmica de contato, representa a taxa de calor transferido por unidade de área, através da interface, devido à uma diferença de temperatura entre as superfícies em contato, ou seja :

$$h = \frac{(Q/A)}{\Delta T} \quad (1.1)$$

onde:

- Q é a taxa de calor transferido;
- A é a área de contato;
- ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies em contato.

1.2 - Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos do presente -
trabalho foram:

- a) Acoplar a aparelhagem experimental, já existente no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e, - anteriormente utilizada para a determinação de difu-
sividades térmicas, a um Sistema de Aquisição de Da-
dos, por intermédio de um Conversor Analógico-Digi-
tal;
- b) Obter, experimentalmente, o valor da condutância de
contato entre duas superfícies metálicas, empregan-
do a Técnica de Pulso de Energia desenvolvida;
- c) Estudar a influência da pressão de contato e da e -
nergia do feixe de laser nessas medidas de condutân-
cia de contato.

2. - CONSIDERAÇÕES FUNDAMENTAIS

2.1 - Revisão da Literatura Existente

O objetivo desta revisão é o de apresentar e discutir, sucintamente, uma série de artigos que têm, de uma certa maneira, estreita relação com o problema a ser tratado neste trabalho.

A apresentação desses artigos será feita em duas partes. Numa primeira parte serão analisados aqueles que tratam diretamente dos problemas relativos à de terminação da condutância de contato entre superfícies sólidas. Na outra parte serão discutidos aqueles relacionados com a Técnica de Pulso de Energia e seu emprego na determinação de propriedades físicas de materiais.

2.1.1 - Condutância Térmica de Contato

Nos últimos trinta anos, foram publicados inúmeros trabalhos, tanto teóricos quanto experimentais, tratando de problemas relacionados com a determinação da condutância térmica de contato entre superfícies metálicas.

Estudos teóricos de grande importância foram os realizados por CETINKALE e FISHENDEN (1951) /8/. Estes pesquisadores analisaram o contato térmico en-

tre dois corpos sólidos. Neste trabalho, as superfícies das amostras consideradas apresentavam rugosidades muito altas, e o contato dava-se por meio de um número limitado de pontos. A principal consequência disto é que a área real de contato representa apenas uma pequena fração da área total da superfície da amostra. Assumindo contatos de forma circular, eles obtiveram a distribuição de temperaturas na interface pelo método de relaxação /2./ e /13./.

Resultados referentes à transferência de calor, entre duas superfícies planas, em função da pressão de contato, foram apresentados por ASCOLI e GERMAGNOLI (1956) /2./. Eles analisaram, também, a influência do acabamento superficial das amostras, nos valores de resistência térmica de contato, que é o inverso da condutância de contato.

O coeficiente de troca de calor na interface, para contatos Alumínio-Alumínio, Alumínio-Ferro e Alumínio-Urânio, foi medido por BOESCHOTEN e VAN DER HELD (1957) /5./. A folga entre as superfícies foi preenchida com três tipos de fluidos: ar, hélio e hidrogênio.

FENECH e ROHSENOW (1959) /14./ demonstraram uma relação para a condutância de contato em termos das propriedades físicas dos materiais em contato, e dos parâmetros geométricos de contato (número de pontos de contato, área real de contato, espessura média dos vazios). Esta teoria permite calcular a condutância de contato para superfícies metálicas, na temperatura e pressão desejadas.

ROSS e STOUTE (1962) /.36./ e RAPIER, JONES e McINTOSH (1963) /.34./ desenvolveram modelos baseados na teoria de CETINKALE e FISHENDEN (1951) /.8./, adotando algumas hipóteses simplificadoras. A principal delas relaciona-se com a dependência entre a condutância térmica e a pressão de contato das superfícies. Ambos os autores consideram a seguinte relação entre as áreas real e aparente de contato:

$$\frac{A_r}{A_a} = \frac{P_a}{P_r} \quad \text{ou} \quad \frac{R_r^2}{R_a^2} = \frac{P_a}{P_r}$$

onde os índices r e a significam, respectivamente, real e aparente.

Todavia, existem duas diferenças fundamentais entre os dois modelos:

- a) ROSS e STOUTE (1962) /.36./ adotam para a pressão real de contato, o valor $0,6H$, enquanto que RAPIER, JONES e McINTOSH (1963) /.34./ adotam o valor $P_r = H$, onde H representa a dureza Meyer do material mais mole, em unidades de pressão;
- b) ROSS e STOUTE (1962) /.36./ estabelecem uma dependência linear entre a condutância térmica e a pressão de contato, enquanto que RAPIER, JONES e McINTOSH (1963) /.34./ introduzem a dependência da condutância de contato com a raiz quadrada a pressão.

A igualdade entre a pressão e a dureza Meyer é válida porque esta propriedade é definida como sendo a pressão média entre a superfície do penetrador e a impressão por ele causada na amostra /.40./.

A utilização de um Computador Analógico, para a obtenção dos perfis de temperatura e determinação dos parâmetros geométricos de contato, como função da pressão de contato entre as superfícies, foi proposta por HENRY e FENECH (1964) /.15./.

CLAUSING e CHAO (1965) /.9./ estudaram os efeitos macroscópicos da resistência ao fluxo de calor na condutância de contato para vários pares de metais similares. Os resultados obtidos para metais, tais como latão, magnésio, aço inoxidável e alumínio, apresentaram boa concordância com as teorias existentes.

Um método para a determinação da condutância de contato na interface de duas placas metálicas em contato, durante a transferência de calor transiente, foi desenvolvido por SCHAUER e GIEDT (1966) /.39./ . Esta técnica baseia-se no aquecimento de uma das placas durante cerca de 100 μ s, pela descarga de uma bateria de capacitores, e na medida da evolução da temperatura com o tempo, nas superfícies de contato.

LEWIS e PERKINS (1968) /.21./ estudaram a dependência da condutância térmica com a direção do fluxo de calor, na superfície de contato entre dois metais

diferentes. Este fenômeno é denominado efeito direcional. - Concluíram, então, que resultados divergentes obtidos por diversos pesquisadores poderiam ser explicados pela existência deste efeito.

O comportamento da condutância térmica de contato, na interface entre as superfícies de contato de dois materiais sólidos, num ambiente de vácuo, foi analisado por COOPER, MIKIC e YOVANOVICH (1969) /.10./.

ROBINSON e TOMSIC (1971) /.35./ investigaram a aplicabilidade do método de onda térmica na medição da condutância de contato. Este método, consiste na utilização de um fluxo de calor periódico e pequenos gradientes de temperaturas. Foram analisados contatos Alumínio-Alumínio e Alumínio-Ferro.

Os efeitos dos modos de deformação do material no valor da condutância de contato, foram estudados por MIKIC (1974) /.23./.

Neste trabalho, foram analisados os seguintes casos : a) deformação plástica pura; b) deformação plástica das asperezas e deformação elástica do substrato; c) deformação elástica pura.

Um programa computacional, escrito em FORTRAN IV, para calcular a condutância de contato na folga entre a pastilha de material combustível e a camisa de revestimento, foi apresentado por OLIVEROS (1975) /.32./.

Este programa, denominado "HGAP", emprega, basicamente, o modelo de ROSS e STOUTE (1962) /.36./ para o cálculo da condu

lância na folga.

JACOBS e TODREAS (1973) /.17./ fizeram uma análise das principais teorias e resultados apresentados por diversos autores. Neste trabalho são discutidas as diferenças básicas entre os principais modelos existentes para a determinação da condutância térmica de contato entre duas superfícies sólidas. Resultados experimentais são comparados com os teóricos. Estes pesquisadores concluíram, por meio destas comparações que, para altas pressões na interface, deve ser considerada a dependência linear entre a condutância e a pressão de contato e, para valores baixos da pressão na interface, deve ser considerada a dependência da condutância de contato com a raiz quadrada da pressão.

2.1.2 - Técnica de Pulso de Energia

A Técnica de Pulso de Energia foi introduzida por PARKER et alli. (1961) /.33./ e, desde então, tem sido extensivamente empregada para medição de propriedades térmicas de materiais. Isso devido sua aplicabilidade numa ampla faixa de temperaturas e possibilidade de trabalho com amostras de dimensões que permitem irradiações em núcleos de reatores nucleares.

PARKER et alli. (1961) /.33./ utilizaram, como fonte pulsada de energia radiante, uma lâmpada flash de xenônio. Outros pesquisadores, como RUDKIN, JENKINS

e PARKER (1962) /.37./ , JENKINS e WESTOVER (1962) /.18./ , BAKER (1964) /.3./ , MOSER e KRUGER (1965) /.24./ , TAYLOR (1965) /.43./ , WHITE e KOYAMA (1968) /.46./ e LARSON e KOYAMA (1968) /.20./ , também utilizaram este tipo de fonte de energia.

Todavia, com o aperfeiçoamento da tecnologia do laser, foi sugerida a substituição da lâmpada-flash de xenônio pelo laser. As justificativas para esta mudança baseiam-se, principalmente, nas características do feixe de laser:

- a) monocromático;
- b) colimado;
- c) podendo concentrar grande quantidade de energia num pequeno volume.

DEEM e WOOD (1962) /.12./ utilizaram, pela primeira vez, o laser como fonte de energia radiante . Posteriormente, ele foi, também, utilizado por TAYLOR e MORREALE (1964) /.42./ ; NAMBA et alli. (1967) /.29./ , MOSER e KRUGER (1967 e 1968) /.25./ e /.26./ , NASU e KIKUCHI (1968) /.30./ ; MURABAYASHI et alli. (1969) /.27./ , SHAW , GOLDSMITH e LITTLE (1969) /.39./ , MURFIN (1970) /.28./ , TAKAHASHI e MURABAYASHI (1975) /.41./ e COSTA (1977) /.11./.

2.2 - Modelo Teórico de PARKER et alli. (1961) /.33./

PARKER et alli. (1961) /.33./ desen -

volveram um modelo teórico para a determinação da difusividade térmica pela Técnica de Pulso de Energia, considerando as seguintes suposições:

- a) a amostra se comporta como uma placa plana infinita;
- b) a amostra apresenta propriedades físicas uniformes;
- c) a temperatura do meio que envolve a amostra é uniforme (por conveniência, igual a zero) ;
- d) as faces paralelas da amostra são adiabáticas;
- e) no instante $t=0$, um pulso instantâneo de energia radiante é uniformemente absorvido na face frontal da amostra ($x=0$) e numa camada superficial de espessura a muito pequena se comparada com a espessura da amostra l .

A distribuição de temperaturas na amostra é governada pela Equação de Fourier :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

onde :

- α é a difusividade térmica;
- $T(x,t)$ é a variável temperatura;
- x é a variável espacial;
- t é a variável temporal.

A solução da Eq.(2.1), com as condições inicial (e) e de contorno (d), fornece a expressão que dá o transiente de temperatura na face posterior da amostra ($x = l$), ou seja :

$$T(l, t) = T_{\infty} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \pi^2 \alpha t / l^2) \right\} \quad (2.2)$$

onde $T_{\infty} = Q / \rho c_p l$ é o acréscimo máximo de temperatura na face posterior da amostra, na ausência de perdas de calor, e Q é a energia total absorvida pela amostra, em cal/cm².

Dividindo a Eq.(2.2) por T_{∞} , obtém-se a expressão para o transiente de temperatura na forma adimensional :

$$V(l, t) = \frac{T(l, t)}{T_{\infty}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 w) \quad (2.3)$$

$$\text{onde : } w = \frac{\pi^2 \alpha t}{l^2} \quad (2.4)$$

PARKER et alli.(1961) /.33./ sugeriram então, duas maneiras distintas para se calcular a difusividade térmica, a saber :

- a) Fazendo $V(l, t) = 0,5$ e $n=1, 2, 3$ e 4 na Eq.(2.3), obtém-se, para o adimensional w , o valor de $1,38$. Resulta, então, da Eq.(2.4), a seguinte expressão para a difusividade térmica α :

$$\alpha = 1,38 \frac{l^2}{\pi^2 t_{\frac{1}{2}}} \quad (2.5)$$

onde $t_{\frac{1}{2}}$ é o tempo necessário para se atingir, na face posterior da amostra, 50% do acréscimo máximo de temperatura.

b) O prolongamento da porção linear da curva $V(l, t)$ versus \underline{w} , representada na Fig.(2.1), intercepta o eixo dos \underline{w} em 0,48. Da Eq.(2.4) obtêm-se, então, para a difusividade térmica α :

$$\alpha = 0,48 \frac{l^2}{\pi^2 t_x} \quad (2.6)$$

onde t_x é o tempo correspondente à intersecção da extrapolação linear com o eixo dos \underline{w} .

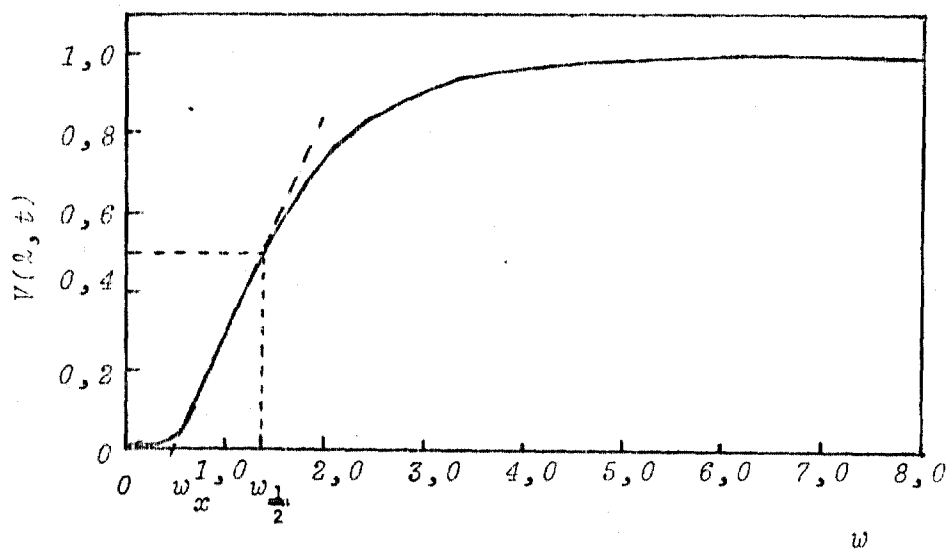


FIG.(2.1) - Transiente de Temperatura Adimensional Dado Pela Eq.(2.3)

Esta Técnica de Pulso de Energia, introduzida por PARKER et alli. (1961) /.33./ e utilizada por muitos pesquisadores na determinação de propriedades físicas, é adaptada, no presente trabalho, para estudar o comportamento da condutância de contato entre duas superfícies sólidas.

Para isso, entretanto, houve a necessidade de se desenvolver um modelo teórico que representasse o problema a ser estudado e permitisse a determinação da condutância de contato, a partir de um transiente de temperatura medido experimentalmente.

2.3 - Modelo Teórico Desenvolvido

Foi desenvolvido, então, um modelo teórico, para calcular a condutância térmica de contato na interface de duas superfícies sólidas, baseado no trabalho de LARSON e KOYAMA (1968) /.20./. Este trabalho consiste na utilização do método flash proposto por PARKER et alli. (1961) /.33./, para determinação de propriedades térmicas de amostras compostas por duas camadas de materiais diferentes, cuja interface é caracterizada por contato perfeito.

As perdas de calor na direção radial foram desprezadas, de acordo com as suposições de CAPE e LEHMAN (1963) /.6./, de que isto é válido para pequenas relações entre a espessura e o diâmetro da amostra considerada. Considerou-se ainda, de acordo com a sugestão encontra-

da no trabalho de LARSON e KOYAMA (1967) /19./, que a duração do pulso de energia é desprezível em comparação com o tempo de duração do experimento, ou seja, com o tempo de difusão do calor na amostra, definido por :

$$\theta = l^2/\alpha \quad (2.7)$$

onde :

l é a espessura da pastilha, em cm;

α é a difusividade térmica do material, em cm^2/s .

Considere-se uma amostra constituída por duas pastilhas cilíndricas de mesmo material, com espessuras l , condutibilidade térmica k , densidade ρ e calor específico c .

A interface entre as pastilhas localiza-se na posição $z=0$, com as faces frontal e posterior, respectivamente, em $z = -l$ e $z = +l$, conforme mostra a Fig. (2.2). No instante inicial $t=0$, quando a amostra está à temperatura ambiente T_0 , a face frontal, $z = -l$, absorve uniformemente um pulso de energia, cujo comportamento temporal é característico do sistema empregado para produzi-lo.

Uma função empírica que descreve o formato do pulso de energia, pode ser escrita na seguinte forma:

$$\dot{q}(t) = (q_0 t/t_p^2) \cdot \exp(-t/t_p) \quad (2.8)$$

onde:

$\dot{q}(t)$ é a taxa de absorção de energia por unidade de área, na face $z = -l$, no tempo t ;

q_0 é a energia total absorvida por unidade de área, na face frontal da amostra;

t_p é o tempo para o qual a amplitude do pulso de calor atinge o valor máximo.

O fluxo de calor na amostra é governado pelas seguintes expressões:

a) Para a pastilha (1) :

$$k \frac{\partial^2 T_1(z, t)}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial t}, \quad -l < z < 0 \quad (2.9)$$

b) Para a pastilha (2) :

$$k \frac{\partial^2 T_2(z, t)}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial t}, \quad 0 < z < +l \quad (2.10)$$

sujeitas às seguintes condições iniciais (a,b), de contorno (c,d) e de interface (e,f) :

$$a) \quad T_1(z, 0_+) = 0, \quad -l < z < 0 \quad (2.11)$$

$$b) \quad T_2(z, 0_+) = 0, \quad 0 < z < +l \quad (2.12)$$

$$c) \quad -k \left. \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} \right|_{z=-l} = \frac{q_0 t}{t_p^2} \exp(-t/t_p) \quad (2.13)$$

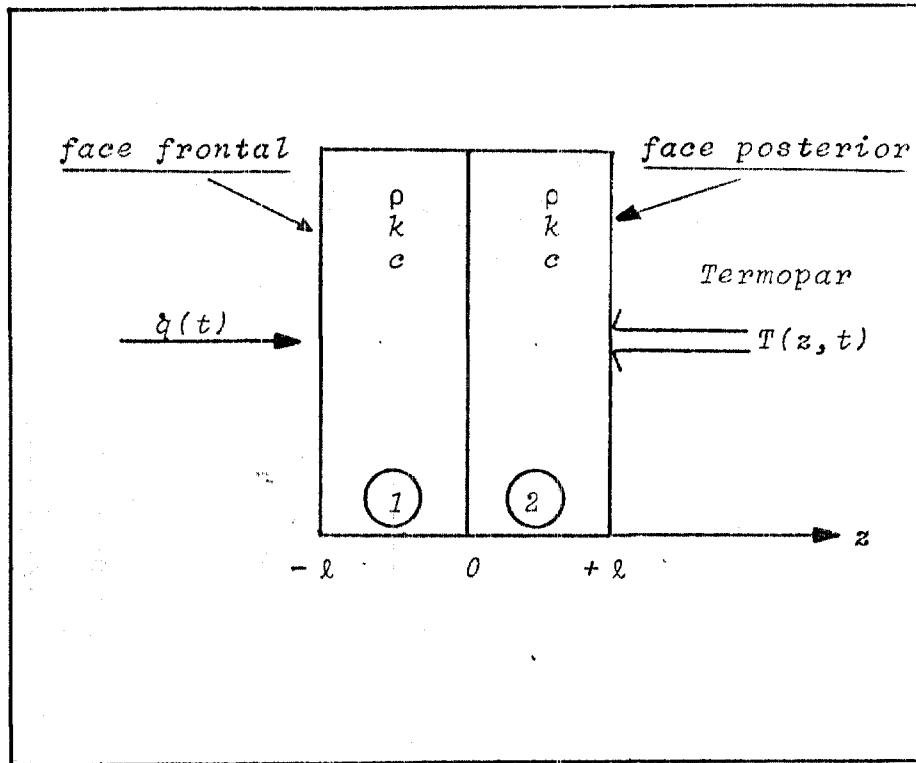


Fig. (2.2) - Diagrama Esquemático da Geometria da Amostra

$$d) \left. \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial z} \right|_{z = +l} = 0 \quad (2.14)$$

$$e) \left. \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} \right|_{z = 0} = \left. \frac{\partial T_2(z, t)}{\partial z} \right|_{z = 0} \quad (2.15)$$

$$f) k \left. \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = h \cdot \{T_2(z, t) - T_1(z, t)\} \Big|_{z=0} \quad (2.16)$$

onde h é a condutância de contato na interface entre as pastilhas (1) e (2).

A Eq.(2.13) descreve a taxa de absorção de calor na face frontal da amostra; a Eq.(2.14) resulta da suposição de que a face posterior da amostra é adiabática; e as Eqs.(2.15) e (2.16) representam a continuidade do fluxo de calor na interface.

Para simplificar a solução do problema representado pelas Eqs.(2.9) a (2.16), é conveniente fazer uso da Transformada de Laplace /1.1/ e /47./. Isto porque a função que descreve o fluxo de calor incidente na face frontal da amostra, representada pela Eq.(2.8) e utilizada na condição de contorno (c), possui uma Transformada de Laplace particularmente simples.

Aplicando-se então, Transformada de Laplace às Eqs.(2.9) e (2.10), e utilizando-se as condições iniciais representadas pelas Eqs.(2.11) e (2.12), as primeiras assumem a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_1(z,s)}{\partial z^2} - K^2 \bar{T}_1(z,s) = 0 \quad , \quad -l < z < 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_2(z,s)}{\partial z^2} - K^2 \bar{T}_2(z,s) = 0 \quad , \quad 0 < z < +l \quad (2.18)$$

onde $K^2 = s/\alpha$ e $\alpha = k/\rho c_p$

Por procedimento análogo, as condições de contorno, representadas pelas Eqs.(2.13) e (2.14) e as condições de interface, representadas pelas Eqs.(2.15) e (2.16), tomam a seguinte forma, respectivamente:

$$-k \left. \frac{\partial \bar{T}_1(z, s)}{\partial z} \right|_{z = -l} = \frac{q_0 \cdot (s + t_p^{-1})^{-2}}{t_p^2} \quad (2.19)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}_2(z, s)}{\partial z} \right|_{z = +l} = 0 \quad (2.20)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{T}_1(z, s)}{\partial z} \right|_{z = 0} = \left. \frac{\partial \bar{T}_2(z, s)}{\partial z} \right|_{z = 0} \quad (2.21)$$

$$k \left. \frac{\partial \bar{T}_1(z, s)}{\partial z} \right|_{z = 0} = h \cdot \{ \bar{T}_2(z, s) - \bar{T}_1(z, s) \} \Big|_{z = 0} \quad (2.22)$$

As soluções gerais das Eqs. (2.17) e (2.18) são, então, respectivamente :

$$\bar{T}_1(z, s) = A_1 \cosh(Kz) + B_1 \sinh(Kz) \quad (2.23)$$

$$\bar{T}_2(z, s) = A_2 \cosh(Kz) + B_2 \sinh(Kz) \quad (2.24)$$

Portanto, os fluxos de calor nas pastilhas (1) e (2) são, respectivamente :

$$\frac{\partial \bar{T}_1(z, s)}{\partial z} = KA_1 \sinh(Kz) + KB_1 \cosh(Kz) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \bar{T}_2(z, s)}{\partial z} = KA_2 \sinh(Kz) + KB_2 \cosh(Kz) \quad (2.26)$$

onde:

$\bar{T}_1(z, s)$ é a Transformada de Laplace de $T_1(z, t)$;

$\bar{T}_2(z, s)$ é a Transformada de Laplace de $T_2(z, t)$.

A solução final para a distribuição de temperaturas na face posterior da amostra, na forma adimensional, é :

$$\begin{aligned}
 V(l, t) = & 1 + 2\gamma^2 \cdot \sum_1^{\infty} \left[\exp(-\beta_k^2 t / \theta) / (\gamma - \beta_k^2)^2 \cdot \right. \\
 & \left. \{ (\cos^2 \beta_k - \text{sen}^2 \beta_k) - \frac{k}{2hl} (\text{sen}^2 \beta_k + 2\beta_k \text{sen} \beta_k \cos \beta_k) \} \right] - \\
 & \{ \sqrt{\gamma} \exp(-\gamma t / \theta) / [2 \cos(\sqrt{\gamma}) \text{sen}(\sqrt{\gamma}) - \frac{k\sqrt{\gamma}}{hl} \text{sen}^2(\sqrt{\gamma})] \} \cdot \\
 & \{ 2\gamma t / \theta + [\cos(\sqrt{\gamma}) \text{sen}(\sqrt{\gamma}) \cdot (1 - k\gamma / hl) + \\
 & \sqrt{\gamma} \cdot (\cos^2(\sqrt{\gamma}) - \text{sen}^2(\sqrt{\gamma}) - \frac{k\sqrt{\gamma}}{hl} \cdot \text{sen}^2(\sqrt{\gamma})) / \\
 & (\cos(\sqrt{\gamma}) \text{sen}(\sqrt{\gamma}) - \frac{k\sqrt{\gamma}}{2hl} \text{sen}^2(\sqrt{\gamma}))] \} \quad (2.27)
 \end{aligned}$$

onde :

- h é a condutância de contato na interface;
- k é a condutibilidade térmica do material;
- l é a espessura de cada pastilha;
- t é a variável temporal;
- t_p é o tempo para o qual a amplitude do pulso de calor atinge o valor máximo;
- β_k são os autovalores da equação:

$$2 \text{sen} \beta_k \cos \beta_k - \frac{k\beta_k}{hl} \text{sen}^2 \beta_k = 0 \quad (2.28)$$

- γ é um parâmetro que depende da forma do pulso -
de energia ($\gamma = \theta/t_p$);
- θ é o tempo de difusão do calor em cada metade -
da amostra ($\theta = l^2/\alpha$);

3. - MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 - Descrição da Técnica de Pulso de Energia

A Técnica de Pulso de Energia consiste em incidir na face frontal de uma amostra-alvo, um pulso de energia radiante de curta duração, provido por um laser e em medir o transiente de temperatura resultante na face posterior daquela amostra.

3.2 - Descrição do Procedimento de Medida Convencional

No método convencional de detecção de transientes de temperaturas em amostras irradiadas por um pulso de energia, o sinal fornecido pelo termopar é amplificado e registrado como uma curva de f.e.m. versus tempo, na tela de um osciloscópio. Utilizando-se um osciloscópio com memória, na tela esta curva pode ser fotografada por uma câmara Polaroid e então analisada.

3.3 - Descrição do Procedimento de Medida Utilizado

O procedimento experimental empregado no presente trabalho, baseia-se na obtenção dos pontos experimentais, que constituem a curva que descreve a evolução da temperatura na face posterior da amostra em função do

tempo, por intermédio de um Conversor Analógico-Digital e um Computador PDP-11/45, com 32 K-bytes de memória.

A curva experimental é, então, ajustada à função teórica desenvolvida para esta finalidade, apresentada no capítulo anterior. Ajusta-se o parâmetro h , que representa a condutância de contato na interface $z=0$, de modo que as curvas teórica e experimental coincidam o mais possível.

A aquisição dos dados experimentais, que é feita pelo programa "CONDUT", escrito em FORTRAN IV, consiste na leitura e registro, pelo Computador PDP-11/45, do sinal do transiente de temperatura fornecido pelo termopar, na forma de uma sequência de pontos.

O processamento desses pontos, que é feito pelo programa "AJUST2", escrito, também, em FORTRAN IV, consiste, basicamente, no ajuste da função teórica desenvolvida e no cálculo do parâmetro relacionado com a condutância de contato.

As listagens desses dois programas computacionais encontram-se no Apêndice B.

3.4 - Arranjo Experimental

3.4.1 - Diagrama de Blocos do Arranjo Experimental

As Figs. (3.1a) e (3.1b) apresentam, -

respectivamente:

- a) o diagrama de blocos do arranjo experimental utilizado para a detecção de transientes de temperatura, pela técnica convencional;
- b) o diagrama de blocos do arranjo experimental utilizado, neste trabalho, para a detecção de transientes de temperatura, para a determinação da condutância de contato.

3.4.2 - Descrição do Arranjo Experimental

A fonte pulsada de energia radiante - utilizada neste trabalho, consistiu de um laser de rubi, modelo 101-6 da Spacerays. O elemento emissor de ftons, denominado material laser, é formado por um cilindro de rubi dopado com cromo, de 16,82 cm de comprimento e 0,95 cm de diâmetro. O comprimento de onda do feixe de laser é de 0,6943 μ m, e a duração do pulso é da ordem de 1 ms.

Verificou-se, experimentalmente, que a forma e a largura dos pulsos variam com a energia do laser (Vide Fig. (A.1) do Apêndice A). Entretanto, estes pulsos podem ser convenientemente caracterizados pela tensão da bateria de condensadores, ou seja, pela tensão fornecida às lâmpadas-flash de xenônio que excitam o material laser. Segundo dados fornecidos pelo fabricante, a energia máxima de emissão do feixe de laser é da ordem de 40 joules, cor -

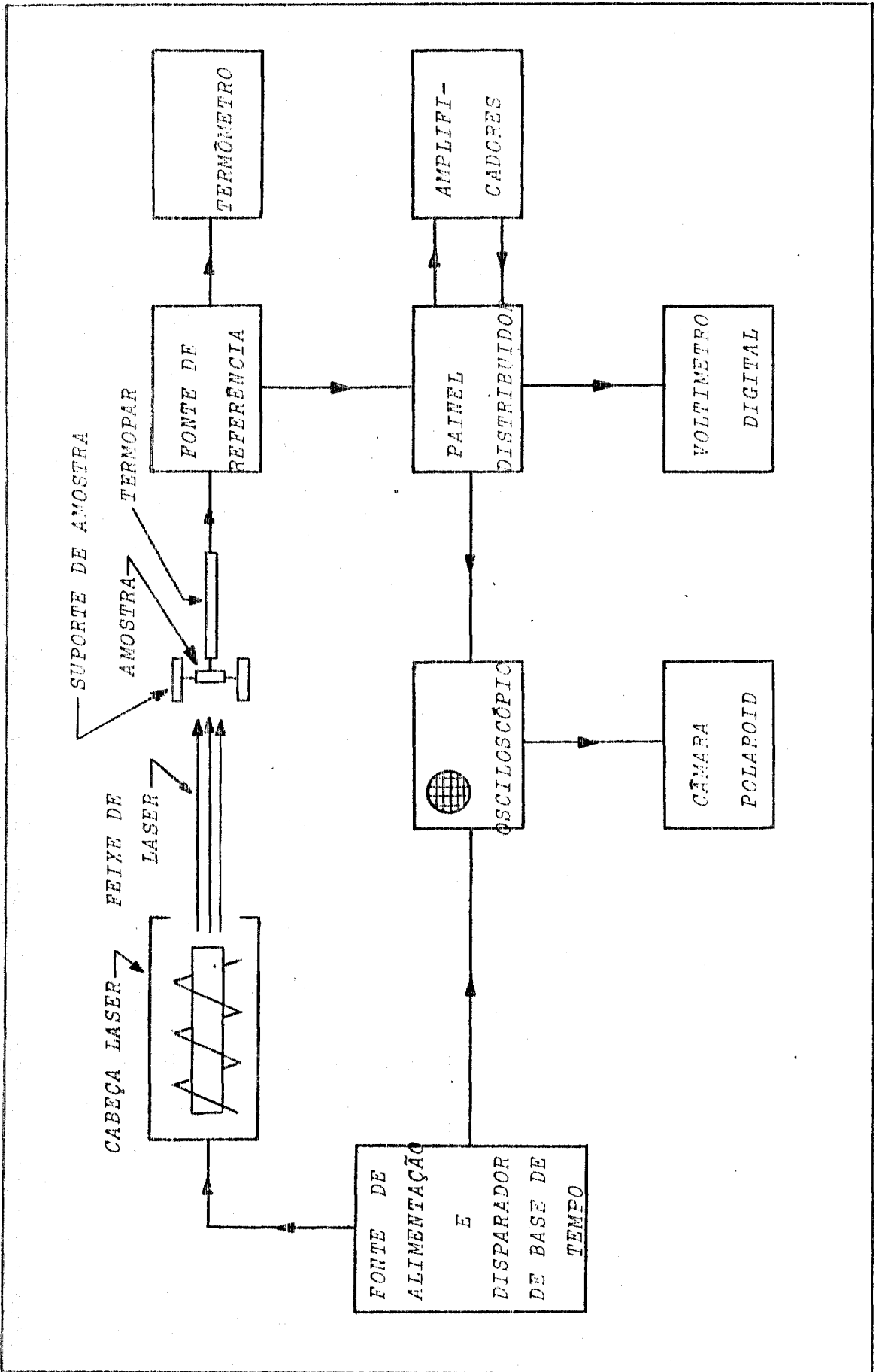


FIG. (3.1a) - Arranjo Experimental Convencional para Detecção de Transientes de Temperaturas.

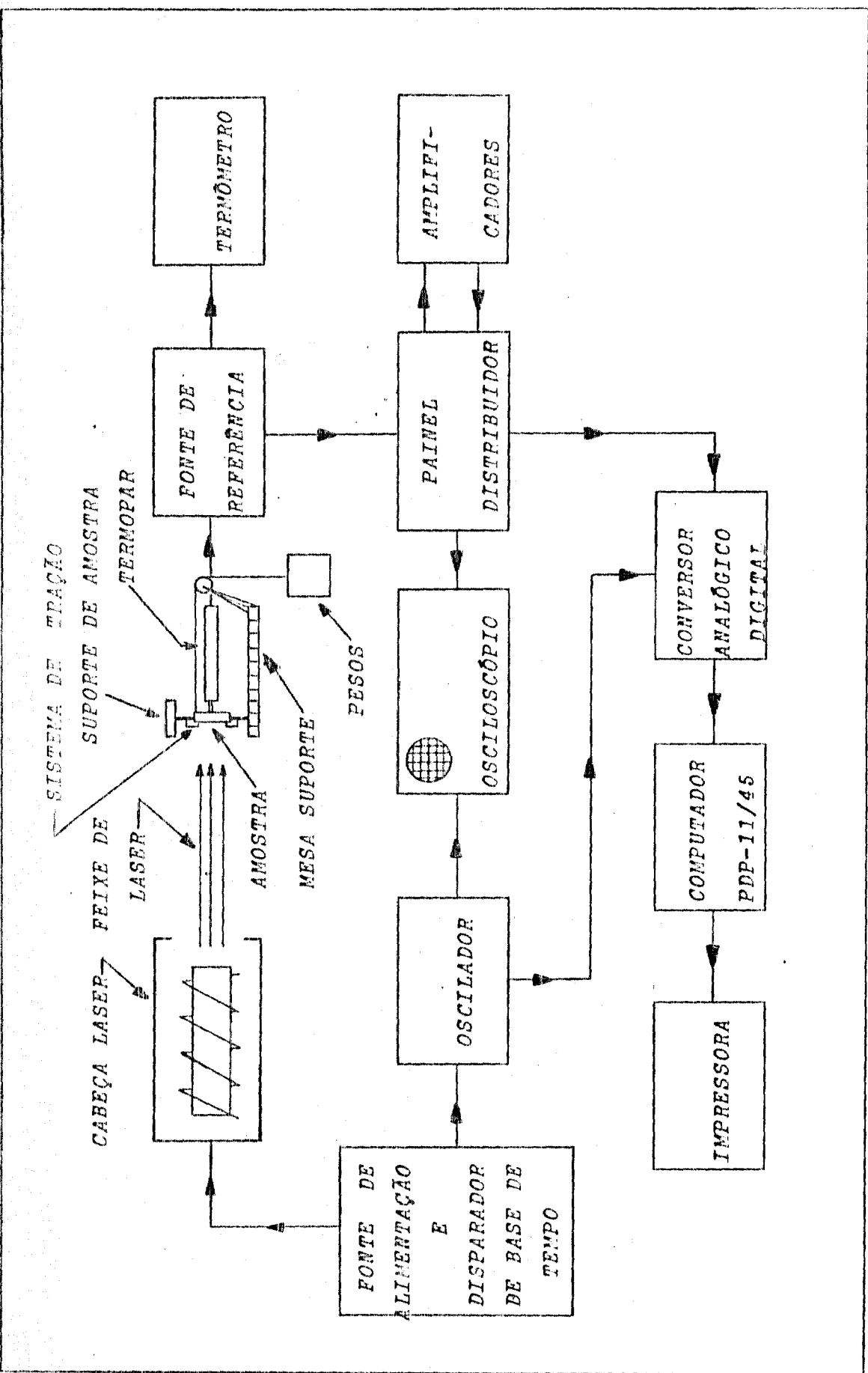


FIG. (3.1b) - Arranjo Experimental Utilizado na Determinação da Condutância de Contato

respondendo a uma tensão de 3.600 VDC.

As amostras foram cortadas de uma barra de Ferro Eletrolítico-734, fornecida pelo "National Bureau of Standards", Estado Unidos. As amostras-alvo, na forma de pastilhas cilíndricas, de 0,9 cm de diâmetro e espessuras de 0,096 ; 0,099 e 0,101 cm, foram cortadas dessa barra e faceadas.

O suporte das amostras foi projetado de forma a minimizar as perdas de calor por condução na direção radial. Para isso, as pastilhas foram colocadas, primeiramente, entre dois anéis de Teflon,^{R†} conforme mostra a FIG. (3.2). O conjunto anéis-pastilhas foi afixado à mesa suporte por meio de um sistema de tração, que além de manter fixo o conjunto, permite pressionar uma pastilha contra a outra. O sistema de tração foi projetado de forma a permitir a variação da pressão de contato entre as pastilhas por meio da alteração dos pesos que são colocados na extremidade livre do sistema. As amostras foram posicionadas de maneira que o feixe incidente fosse perpendicular à face frontal. A Fig.(3.3) mostra uma vista da mesa-suporte com o sistema de tração e fixação da amostra.

O termopar utilizado foi o de Cromel-Alumel, tipo K ($40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), com aproximadamente 15 cm de comprimento e fios de 0,18 mm de diâmetro. Os fios estavam revestidos por aço inoxidável-318 e isolados entre si e do revestimento, por óxido de magnésio.

† Marca Registrada da E.I. du Pont de Nemours & Company.

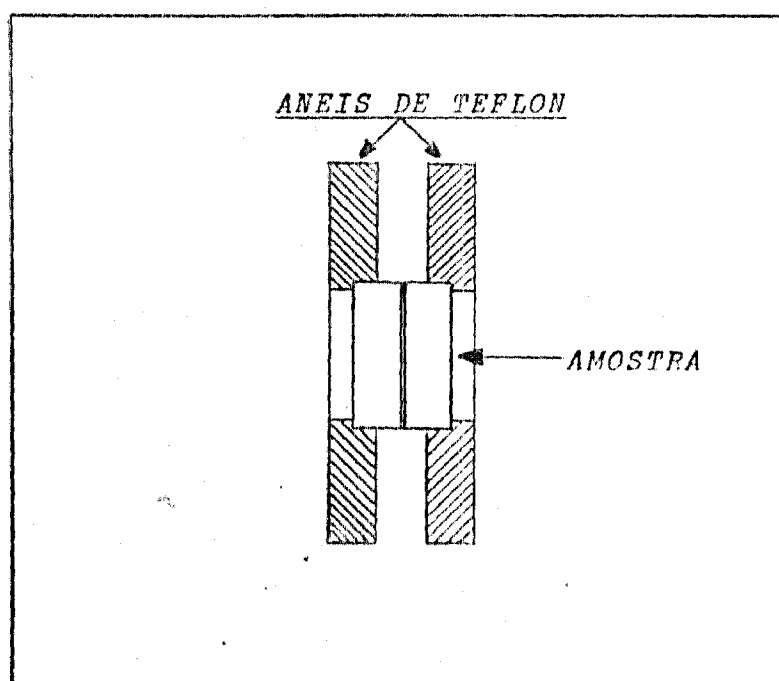


FIG.(3.2) - Diagrama Esquemático do conjunto anéis-pastilhas

do termopar e a face posterior da amostra foi feito por pressão, com os fios separados por uma distância de aproximadamente 2 mm. Com isto, o circuito do termopar foi fechado através da amostra, garantindo-se que a temperatura medida era a da amostra e não a da junção dos fios, o que poderia ocorrer caso se tivesse utilizado o termopar com as pontas soldadas. As extremidades livres do termopar foram soldadas a um conector especial (THERMOCOAX-MF3). A ligação do termopar à fonte de referência foi feita por meio de um cabo coaxial blindado, também de Cromel-Alumel.

A fonte de referência consistiu de um vaso de Dewar com 25 cm de altura e 8 cm de diâmetro, revestido por uma camada de material isolante térmico de aproxima

damente 7 cm de espessura. Neste vaso, a junção de referência do termopar, colocada dentro de um tubo de vidro de 15 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, foi imersa numa mistura de água e gelo a 0°C. A junção de referência do termopar foi ligada a um painel distribuidor por meio de um cabo coaxial de cobre blindado.

Do painel distribuidor, o sinal fornecido pelo termopar foi enviado para uma associação em série de dois amplificadores, com ganhos respectivamente iguais a 500 e 20, proporcionando, portanto, uma amplificação total do sinal, de 10.000 vezes. Os amplificadores utilizados foram: a) (Ganho = 500) Modelo 605 K da Analog Devices, com impedância de entrada de 1 GΩ e resposta em frequência de 0,5 a 3,0 KHz; b) (Ganho = 20) Modelo 3300 A da Ectron Corporation, com impedância de entrada de 10 MΩ e resposta em frequência de 0 a 20 KHz. O sinal duplamente amplificado foi, então, enviado para o computador PDP-11/45, da Digital Equipment Corporation, com 32 K-bytes de memória, por intermédio de um Conversor Analógico-Digital, modelo ADF-11, onde foi registrado na forma de pontos experimentais e para um osciloscópio com memória, modelo 141 A, da Hewlett Packard.

Para sincronizar o disparo do laser com o início da leitura do sinal do termopar pelo computador, foi acoplado, ao sincronismo externo do Conversor Analógico-Digital, um oscilador de quartzo, com frequência calibrada em 100 Hz. Este oscilador foi também ligado ao osci

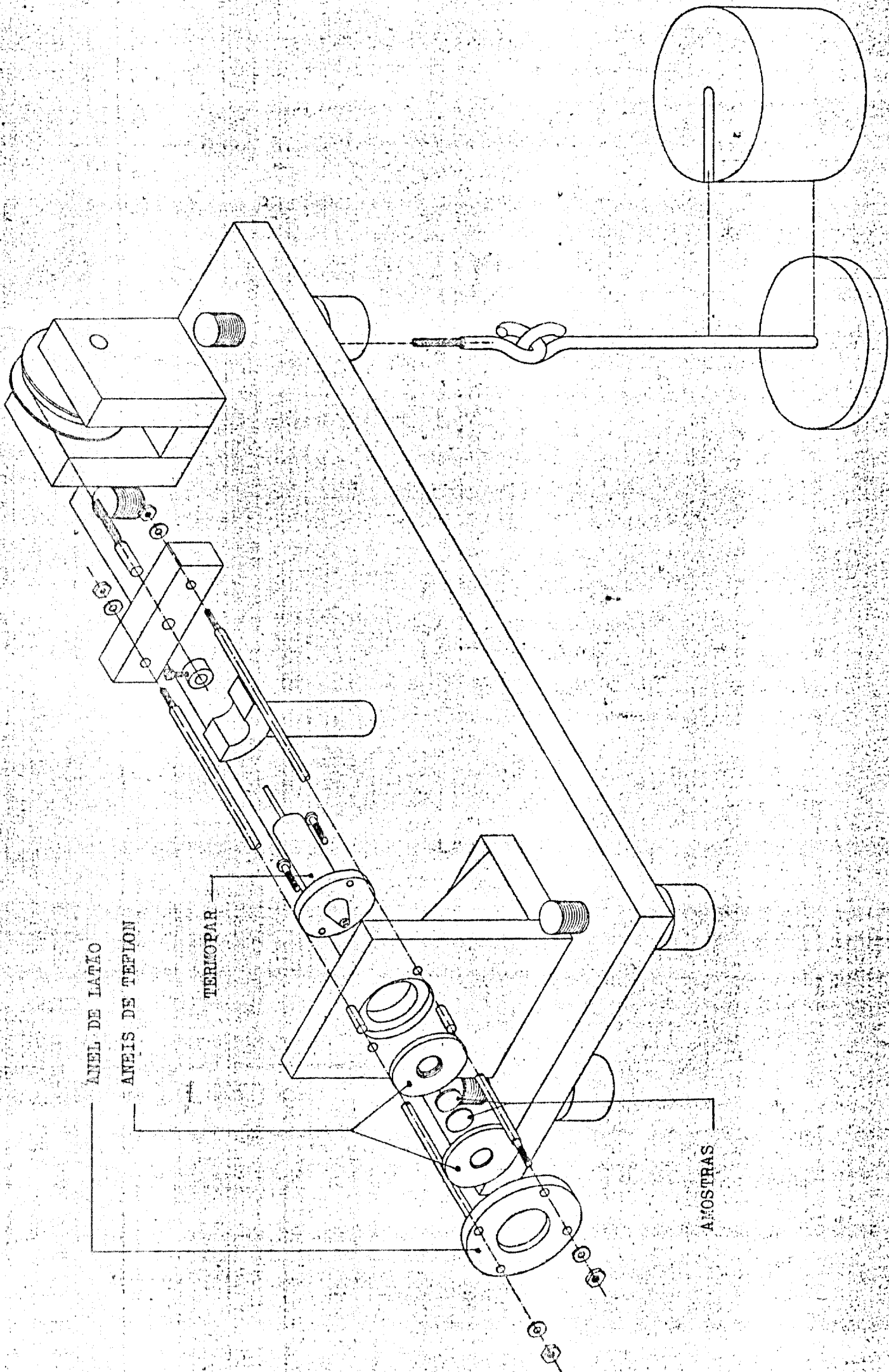


FIG. (3.3) - Vista da Mesa-Suporte e Sistema de Traction e Fricção da Amostra

oscópio e à unidade de alimentação da cabeça laser. No instante da emissão do pulso de disparo das lâmpadas-flash de xenônio, que estimulam o material laser, a unidade de alimentação fornece, também, um pulso que dispara o oscilador e, portanto, o Conversor Analógico-Digital, o Computador e a base de tempo do osciloscópio, todos simultaneamente.

3.5 - Programa Experimental

3.5.1 - Experiências Preliminares Para Comprovação do Procedimento de Medida Desenvolvido

Em se tratando de uma nova maneira de se medir o transiente de temperatura, resultante da aplicação da Técnica de Pulso de Energia, foi necessário projetar e executar a interligação do equipamento experimental convencional, mostrado na Fig.(3.1a), com o Sistema de Aquisição de Dados, instalado no Centro de Engenharia Nuclear e representado por um Computador PDP-11/45 com 32 K-bytes de memória e um Conversor Analógico-Digital.

Para isso, a saída do conjunto de amplificadores foi ligada diretamente à um dos canais de leitura do Conversor Analógico-Digital, por meio de um cabo coaxial blindado. Para servir de sincronismo externo entre o Computador e a aparelhagem experimental, foi construído um oscilador de quartzo. Este oscilador determina, também, o número de pontos do transiente a serem lidos, por segun -

do, ou seja, a velocidade de leitura do Conversor Analógico digital.

Para fazer uma avaliação do desempenho do procedimento experimental desenvolvido, foram feitas algumas experiências, com o objetivo de calcular a difusividade térmica do Ferro Eletrolítico-734.

Neste programa preliminar o sinal fornecido pelo termopar foi amplificado e registrado pelo Computador na forma de uma sequência de pontos. Ao conjunto de pontos foi, então, ajustada a função teórica, representada pela Eq. (2.3), por um método de mínimos quadrados /4./, - /16./, /22./ e /31./. Este ajuste forneceu, diretamente, o valor de um parâmetro relacionado com a difusividade térmica.

A leitura dos pontos experimentais e o ajuste da curva, por eles definida, foram feitos, respectivamente, pelos programas "DIFTER" e "AJUST1", escritos em FORTRAN IV.

Por este procedimento, o valor da difusividade térmica é determinado à partir de informações contidas em todos os pontos da curva experimental. Convém ressaltar, neste ponto, que, no método originalmente sugerido por PARKER et alli. (1961) /33./, e que foi analisado no capítulo anterior, leva-se em conta apenas um ponto da curva na determinação desta propriedade.

Os valores obtidos para a difusividade térmica do Ferro Eletrolítico-734, pelo procedimento de-

desenvolvido para esse trabalho, apresentaram uma variação de aproximadamente $\pm 5\%$ em relação àqueles calculados pelo método convencional, ou seja, por aquele proposto por PARKER et alii. (1961) /.33./ e utilizado, entre outros, por COSTA (1977) /.11./. Os valores dos desvios médios quadráticos resultantes dos ajustes, por mínimos quadrados, dos pontos experimentais pela função teórica, foram da ordem de 10^{-3} . O erro máximo no parâmetro α , estimado pelo programa "AJUST1", foi de $\pm 0,02\%$ para amostra de 0,22 cm de espessura e tensão de 1900 VDC provida às lâmpadas-flash de xenônio.

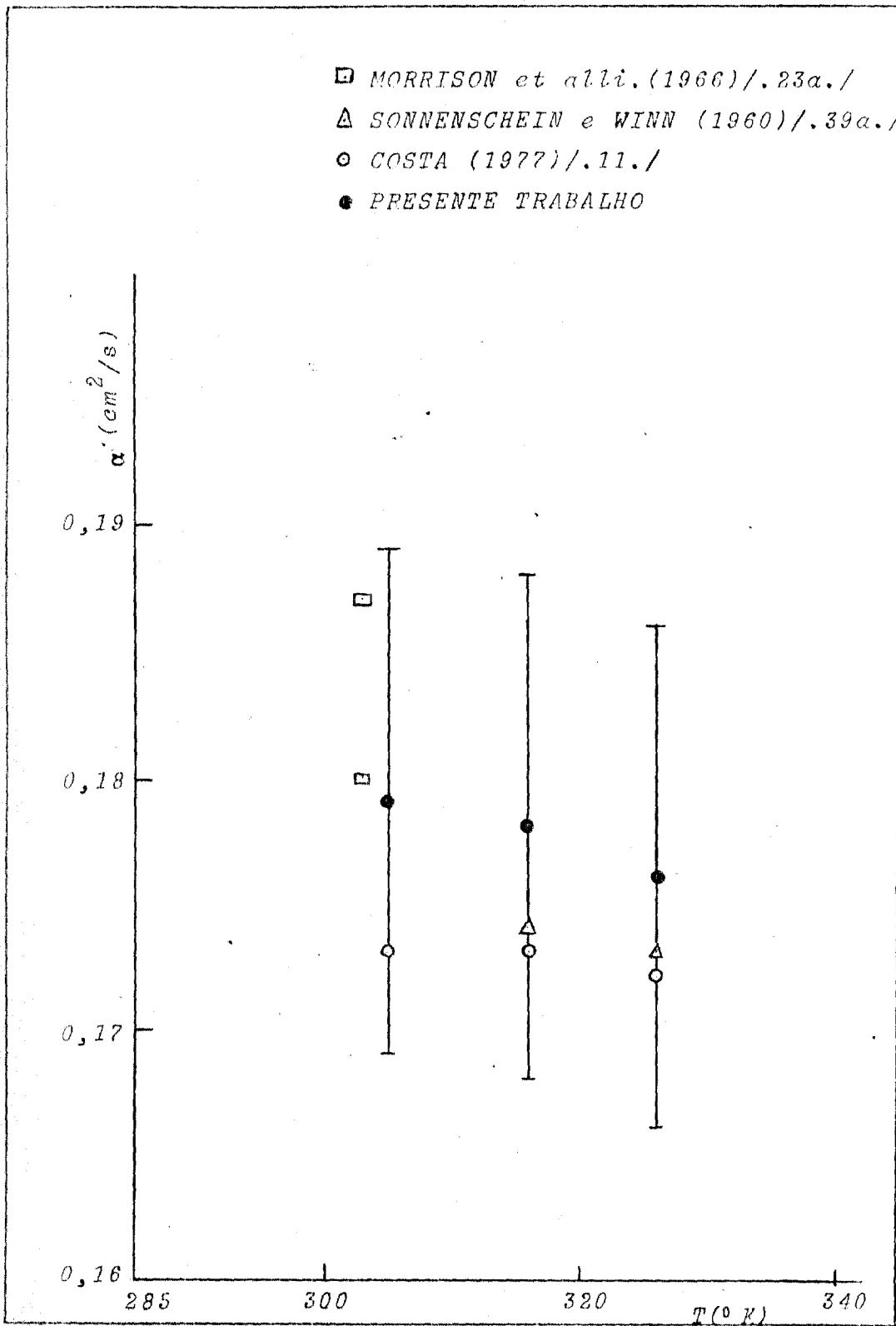
Os valores obtidos para a difusividade térmica do Ferro Eletrolítico-734, pelo procedimento experimental desenvolvido, acham-se comparados com os valores encontrados na literatura, na Fig. (3.4).

3.5.2 - Experiências Realizadas Para a Determinação da Condutância de Contato

O objetivo final deste trabalho foi o de estudar a dependência da condutância de contato, entre duas pastilhas cilíndricas de Ferro Eletrolítico-734, com a pressão de contato na interface e com a energia do feixe de laser.

Para o cumprimento deste objetivo foram realizados três grupos de experimentos, com pastilhas, respectivamente, de 0,096, 0,099 e 0,101 cm de espessura. Para cada grupo de experimentos foram utilizadas pressões -

de contato de 5,1 , 6,7 , 8,3 , 9,5 , 10,8 e 12,1 Kgf/cm² - entre as pastilhas e, para cada valor da pressão foi alterada a tensão de alimentação das lâmpadas-flash de xenônio - (1900, 2100 e 2300 VDC) e, conseqüentemente, a energia do feixe de laser. A correspondência entre a tensão nas lâmpadas-flash e a energia do feixe é mostrada na Tab.(A.1) do Apêndice A.



FIG(3.4) - Difusividade térmica de ferro de alta pureza

4. - RESULTADOS OBTIDOS

As Figs.(4.1a), (4.1b) e (4.1c) mostram transientes de temperaturas característicos dos experimentos realizados, fotografados da tela do osciloscópio por uma câmara Polaroid, para pastilhas de 0,101 cm de espessura e pressão de contato na interface de 6,7 Kgf/cm². Pode-se observar, pelas fotografias, que a um aumento da energia fornecida à amostra-alvo pelo feixe de laser, corresponde um acréscimo de temperatura.

Para os outros grupos de experimentos (amostras de 0,096 e 0,099 cm de espessura), foram obtidas curvas semelhantes às mostradas nas Figs.(4.1a), (4.1b) e (4.1c).

O parâmetro h , relacionado com a condutância de contato, foi estimado por ajuste da curva de pontos experimentais por um método de mínimos quadrados.

Em cada experimento foram processados cerca de 200 pontos experimentais, detectados pelo Computador.

A convergência do programa computacional, durante o processamento dos pontos, foi sempre bastante rápida, independentemente dos valores iniciais dos parâmetros h_0 , que representa a estimativa inicial para a condutância de contato, e β_0 , que representa a estimativa inici-

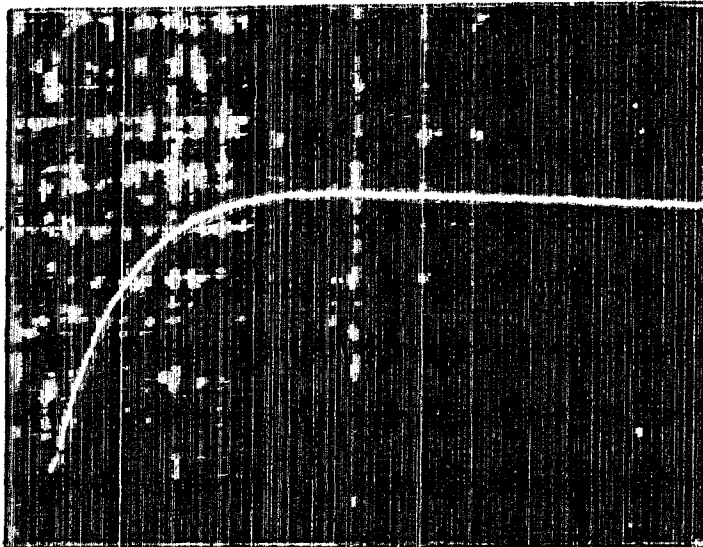


FIG.(4.1a) - Transiente de temperatura registrado na tela do osciloscópio, para tensão de 1900 VDC provida às lâmpadas-flash de xenônio.

Escalas: Horizontal - 0,2 s/div.

Vertical - 0,5 V/div.

Espessura das pastilhas : 0,101 cm

Pressão de contato : 6,7 Kgf/cm²

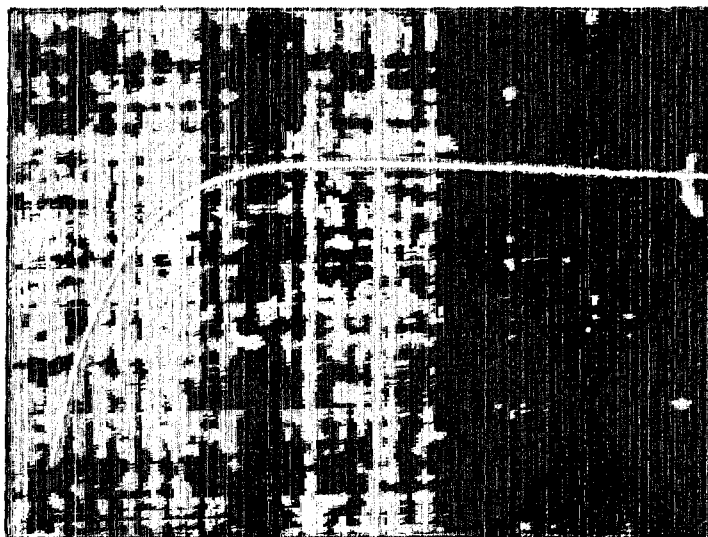


FIG.(4.1b) - Transiente de temperatura registrado na tela do osciloscópio, para tensão de 2100 VDC provida às lâmpadas-flash de xenônio.

Escalas: Horizontal - 0,2 s/div.

Vertical - 1,0 V/div.

· Espessura das pastilhas : 0,101 cm

Pressão de contato : 6,7 Kgf/cm²

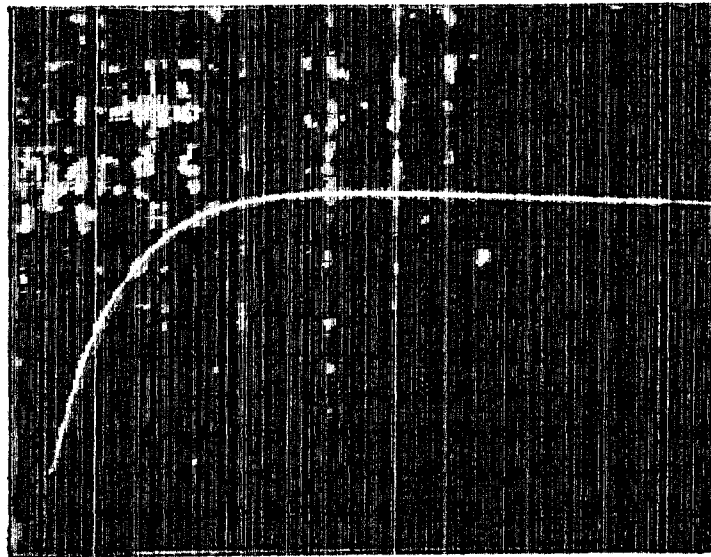


FIG.(4.1c) - Transiente de temperatura registrado na tela do osciloscópio, para tensão de 2300 VDC provida às lâmpadas flash de xenônio.

Escalas: Horizontal - 0,2 s/div.

Vertical - 2,0 V/div.

Espessura das pastilhas: 0,101 cm

Pressão de contato: 6,7 Kgf/cm²

al para a equação de autovalores definida pela Eq. (2.28), do capítulo 2.

Os resultados fornecidos pelo programa "AJUST2", foram sintetizados : na Tab.(4.1), para pastilhas de 0,096 cm de espessura; na Tab.(4.2), para pastilhas de 0,099 cm de espessura; e na Tab.(4.3), para pastilhas de 0,101 cm de espessura.

Cada valor apresentado nestas tabelas resultou de uma média aritmética de três valores, ou seja, cada experimento foi realizado três vezes. Os desvios referentes a estes resultados são também apresentados nas tabelas e, os valores máximos destes desvios foram de : a) $\pm 4,9\%$, para as pastilhas de 0,096 cm de espessura, tensão de 1900 VDC e pressão de contato de 6,7 Kgf/cm² ; b) $\pm 3,3\%$ para as pastilhas de 0,099 cm de espessura, tensão de 2100 VDC e pressão de contato de 12,1 Kgf/cm² ; c) $\pm 5,1\%$, para as pastilhas de 0,101 cm de espessura, tensão de 1900 VDC e pressão de contato de 5,1 Kgf/cm².

Verificou-se, pela análise dos dados das Tab. (4.1), (4.2) e (4.3) que, os valores da condutância crescem com o aumento da pressão de contato entre as pastilhas. Verificou-se, também, que, com o aumento da espessura das pastilhas, ocorre uma diminuição no valor da condutância de contato. Esta diminuição é causada pelo aumento das perdas de calor na direção radial, provocada pelo aumento da relação espessura/diâmetro da amostra.

Observou-se ainda, que os valores de

condutância de contato foram praticamente independentes da energia do feixe de laser.

A qualidade dos ajustes pode ser verificada pelo erro na condutância de contato, que foi da ordem de $\pm 0,035\%$, e pelos valores obtidos para os desvios médios quadráticos, decorrentes do ajuste por mínimos quadrados, que foram da ordem de 10^{-3} .

A curva teórica, da temperatura adimensional $V(h, l, t)$, calculada com o parâmetro h ajustado, para a espessura de 0,099 cm, pressão de 10,8 Kgf/cm² e tensão de alimentação das lâmpadas-flash de xenônio de 1900 VDC, acha-se comparada com os pontos experimentais, na Fig. (4.2).

Os valores das propriedades físicas do material utilizados, Ferro Eletrolítico-734, utilizados no programa "AJUST2", foram tirados da literatura /.44./, /.45./ e /.11./ . Os valores do parâmetro t_p , relacionado com o pulso de energia, foram estimados a partir da Fig. (A.1), do Apêndice A, deste trabalho.

Os resultados das Figs. (4.3), (4.4) e (4.5) ilustram a dependência da condutância de contato com o aumento da pressão na interface. Em cada figura, os pontos foram ajustados por uma reta de mínimos quadrados.

TABELA (4.1) - Resultados fornecidos pelo programa "AJUST2" para o 1º grupo de experimentos. Pastilhas - de Ferro Eletrolítico-734 de 0,096 cm de espessura.

Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 1900 VDC		
PRESSION (Kgf/cm ²)	CONDUTÂNCIA DE CONTATO (cal/cm ² s ⁰ C)	DESVIO DE AJUSTE (× 10 ²)
5,1	0,264 ± 0,012 [†]	0,156 ^{††}
6,7	0,284 ± 0,014	0,149
8,3	0,306 ± 0,012	0,145
9,5	0,349 ± 0,006	0,177
10,8	0,387 ± 0,012	0,261
12,1	0,394 ± 0,008	0,209
Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 2100 VDC		
5,1	0,265 ± 0,008	0,118
6,7	0,282 ± 0,007	0,101
8,3	0,314 ± 0,010	0,145
9,5	0,363 ± 0,013	0,125
10,8	0,392 ± 0,010	0,194
12,1	0,400 ± 0,008	0,219
Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 2300 VDC		
5,1	0,267 ± 0,006	0,113
6,7	0,289 ± 0,010	0,107
8,3	0,320 ± 0,008	0,123
9,5	0,354 ± 0,006	0,125
10,8	0,394 ± 0,016	0,143
12,1	0,401 ± 0,007	0,139

† - Desvios referentes à média aritmética

†† - Desvios de ajuste por mínimos quadrados

TABELA (4.2) - Resultados fornecidos pelo programa "AJUST2" para o 2º grupo de experimentos. Pastilhas de Ferro Eletrolítico-734 de 0,099 cm de espessura.

Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 1900 VDC		
PRESSÃO (Kgf/cm ²)	CONDUTÂNCIA DE CONTATO (cal/cm ² s ⁰ C)	DESVIO DE AJUSTE (× 10 ²)
5,1	0,248 ± 0,007 [†]	0,109 ^{††}
6,7	0,280 ± 0,006	0,088
8,3	0,303 ± 0,005	0,134
9,5	0,326 ± 0,004	0,119
10,8	0,350 ± 0,004	0,131
12,1	0,375 ± 0,007	0,155
Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 2100 VDC		
5,1	0,252 ± 0,008	0,125
6,7	0,282 ± 0,007	0,087
8,3	0,312 ± 0,008	0,108
9,5	0,336 ± 0,008	0,118
10,8	0,354 ± 0,010	0,110
12,1	0,394 ± 0,013	0,113
Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 2300 VDC		
5,1	0,264 ± 0,006	0,102
6,7	0,290 ± 0,008	0,110
8,3	0,315 ± 0,009	0,096
9,5	0,340 ± 0,010	0,097
10,8	0,368 ± 0,008	0,111
12,1	0,400 ± 0,012	0,105

† - Desvios referentes à média aritmética

†† - Desvios de ajuste por mínimos quadrados

TABELA (4.3) - Resultados fornecidos pelo programa "AJUST2" para o 3º grupo de experimentos. Pastilhas - de Ferro Eletrolítico-734 de 0,101 cm de espessura.

Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 1900 VDC		
PRESSÃO (Kgf/cm ²)	CONDUTÂNCIA DE CONTATO (cal/cm ² s ⁰ C)	DESVIO DE AJUSTE (× 10 ²)
5,1	0,236 ± 0,012 [†]	0,137 ^{††}
6,7	0,279 ± 0,011	0,160
8,3	0,299 ± 0,012	0,139
9,5	0,314 ± 0,009	0,163
10,8	0,323 ± 0,005	0,157
12,1	0,345 ± 0,009	0,136
Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 2100 VDC		
5,1	0,242 ± 0,012	0,125
6,7	0,284 ± 0,008	0,130
8,3	0,306 ± 0,006	0,114
9,5	0,319 ± 0,007	0,147
10,8	0,332 ± 0,006	0,137
12,1	0,357 ± 0,015	0,148
Tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio : 2300 VDC		
5,1	0,251 ± 0,011	0,124
6,7	0,293 ± 0,013	0,126
8,3	0,309 ± 0,007	0,127
9,5	0,323 ± 0,005	0,135
10,8	0,337 ± 0,007	0,127
12,1	0,360 ± 0,006	0,132

† - Desvios referentes à média aritmética

†† - Desvios de ajuste por mínimos quadrados

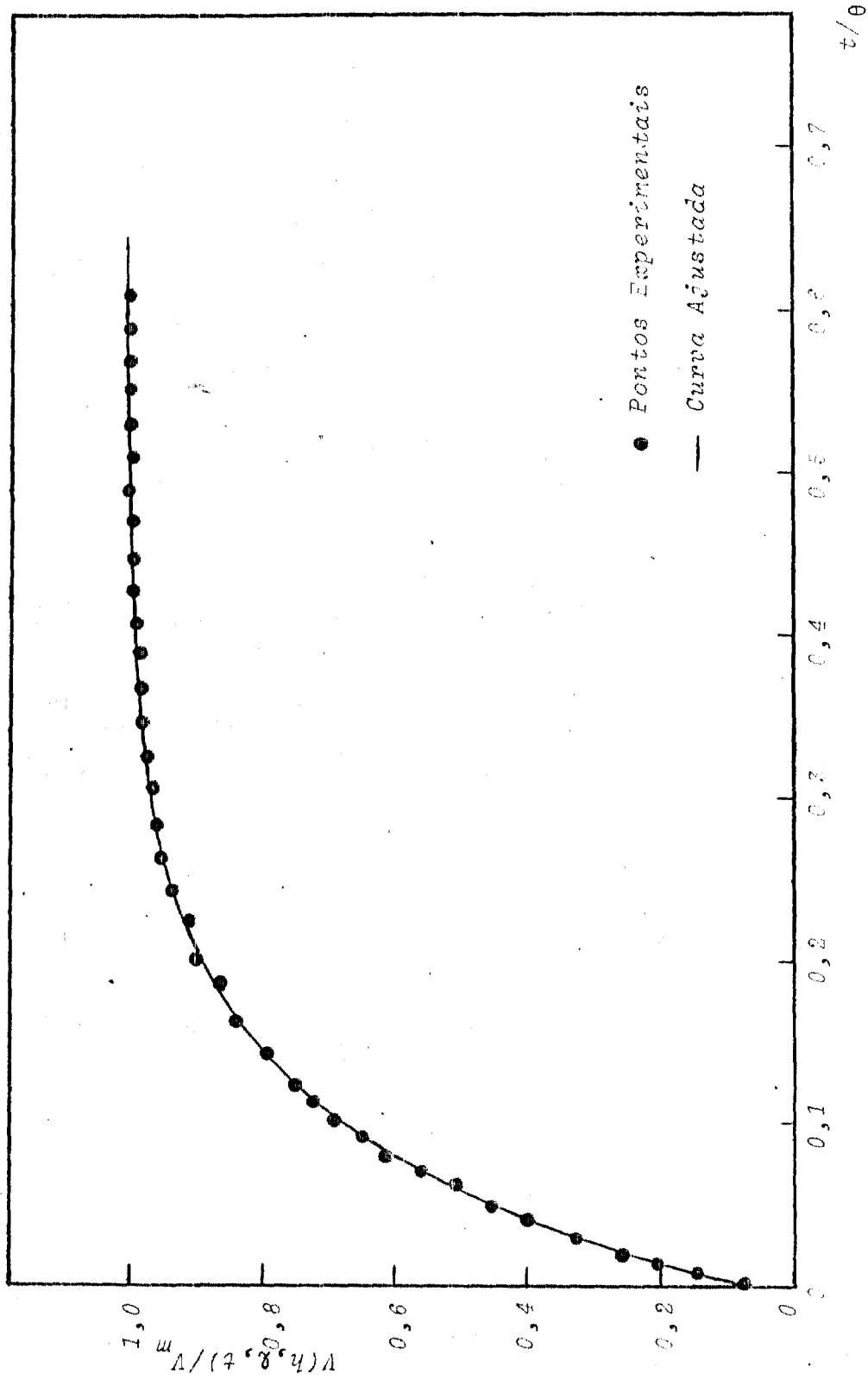


FIG. (4.2) - Comparação da curva teórica ajustada com os correspondentes pontos experimentais.

Espessura = 0,099 cm ; Tensão = 1900 VDC ; Pressão = 10,8 Kg.f/cm²

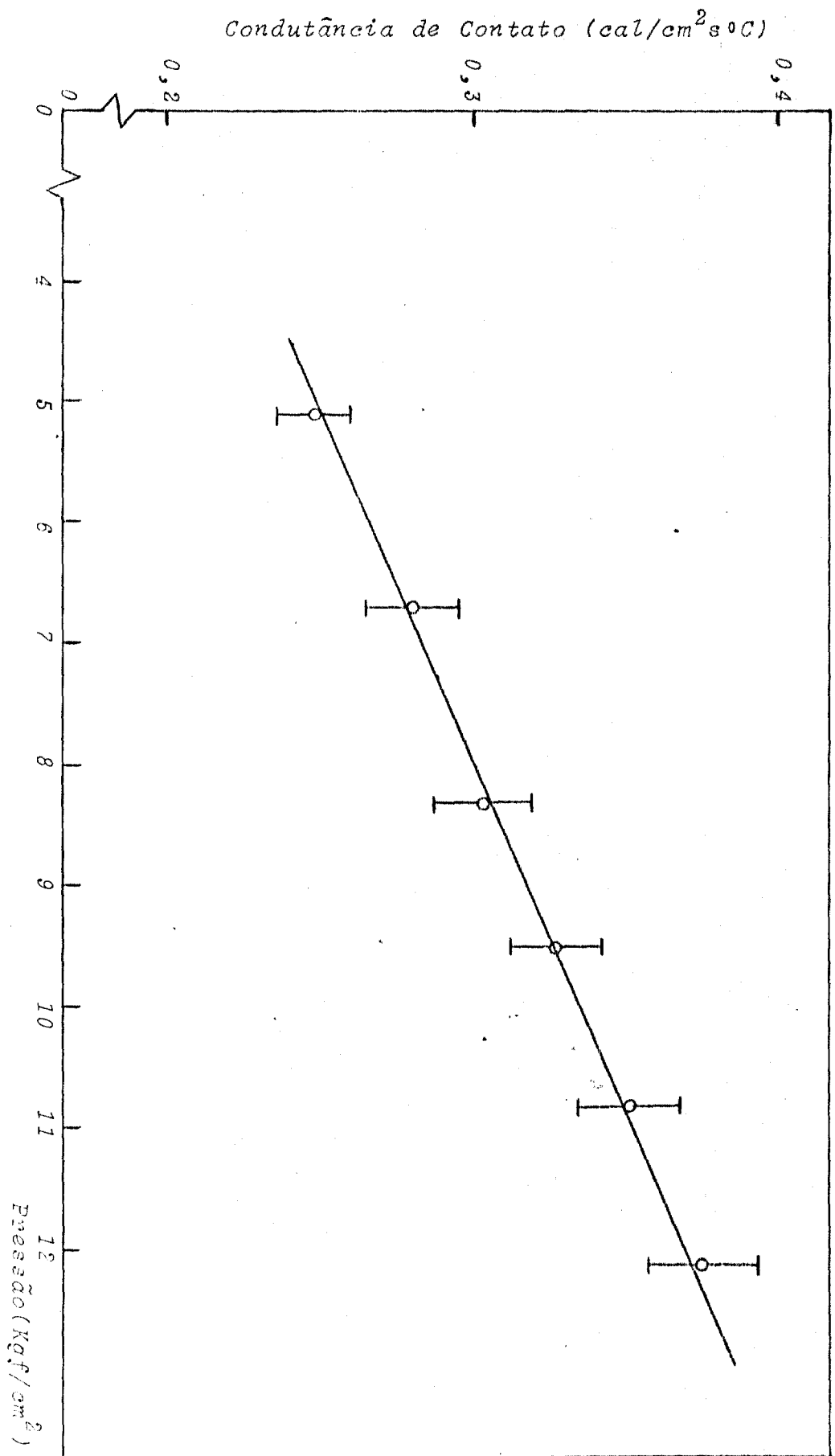


FIG. (4.3) - Dependência da Condutância de Contato com a Pressão na Interface
 Espessura = 0,099 cm ; Tensão = 1900 VDC

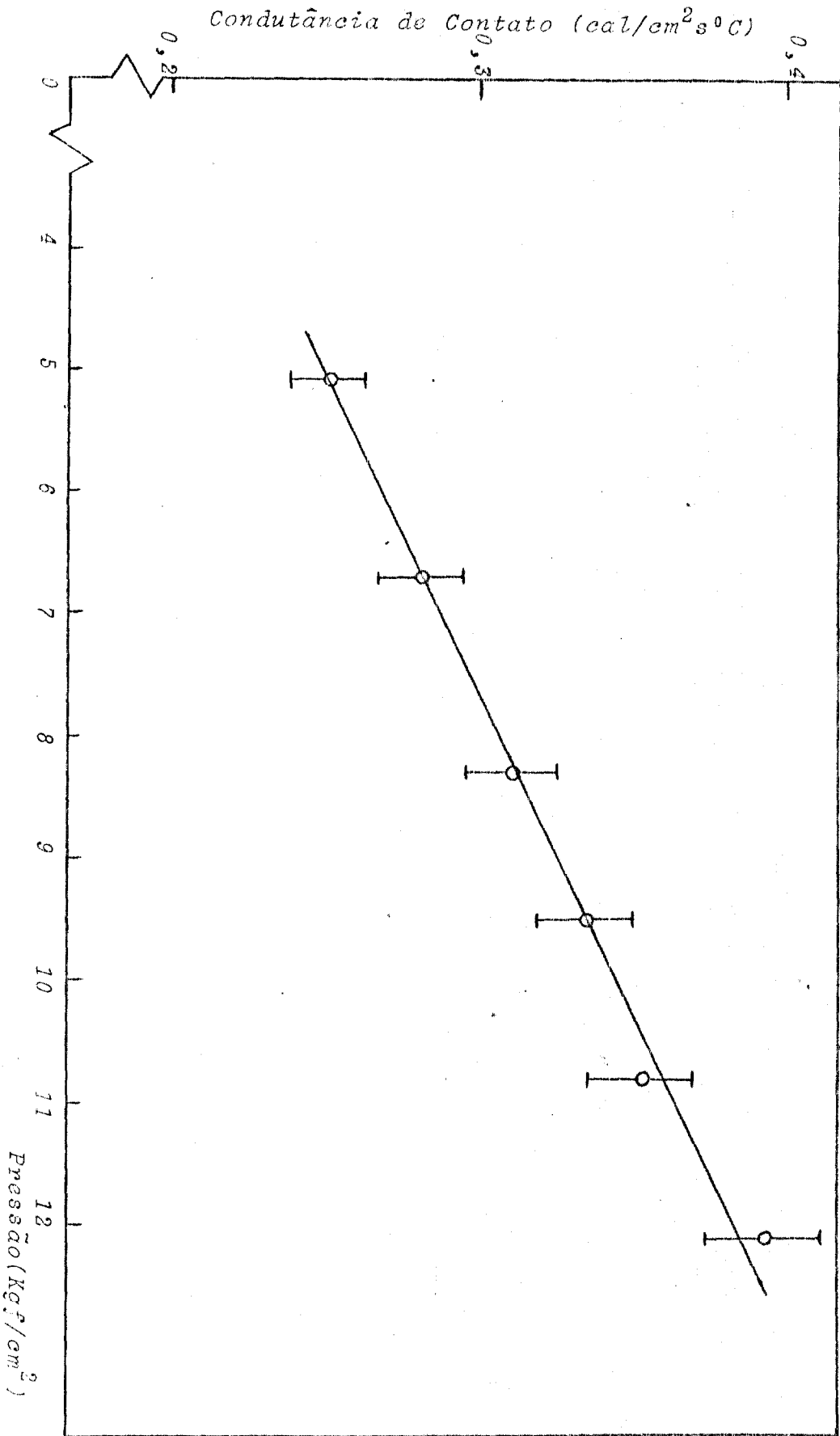


FIG. (4.4) - Dependência da Condutância de Contato com a Pressão na Interface
Espessura = 0,099 cm ; Tensão = 2100 VDC

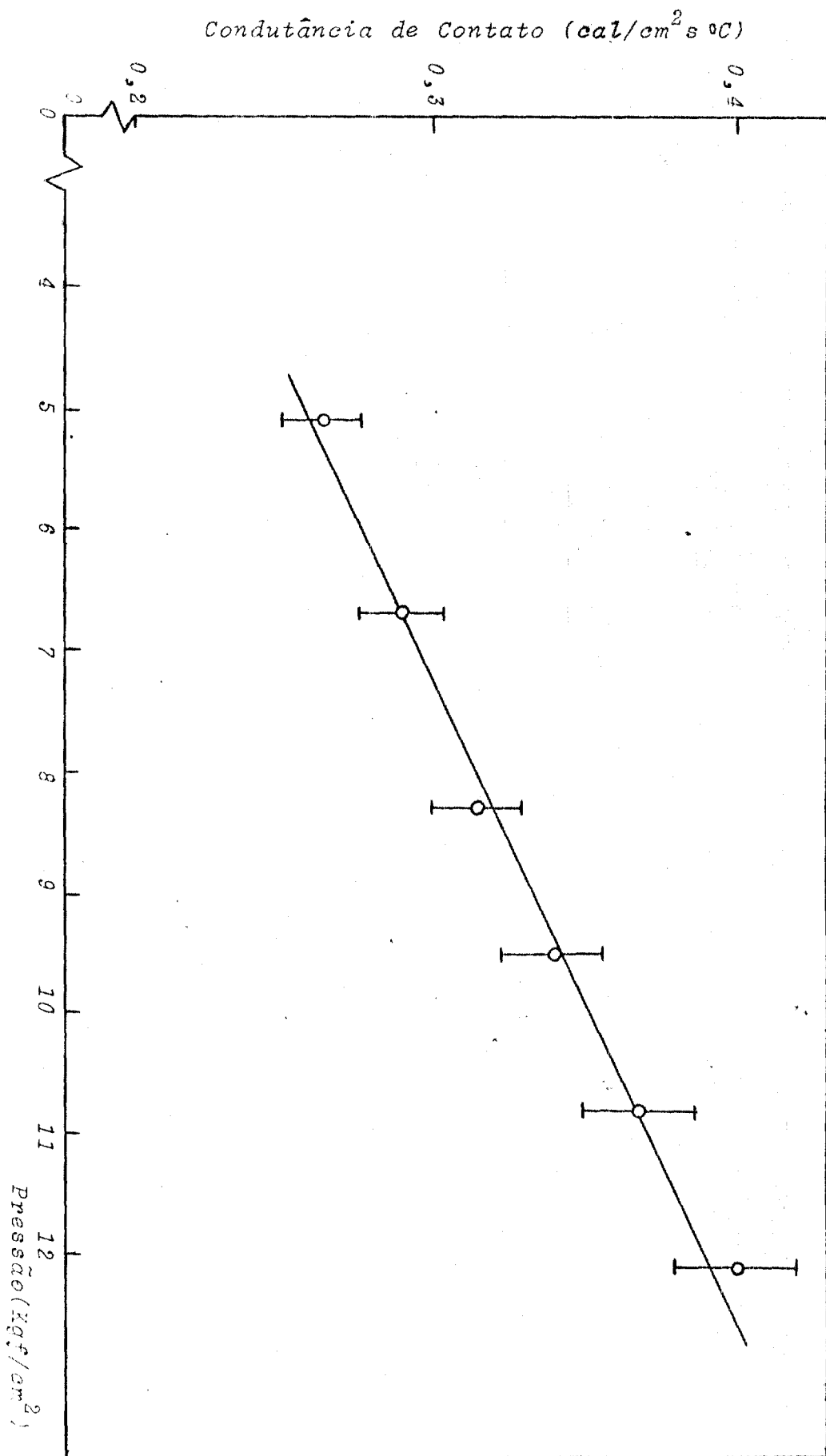


FIG. (4.5) - Dependência da Condutância de Contato com a Pressão na Interface
 . Espessura = 0,099 cm ; Tensão = 2300 VDC

4.1 - Comparação com a Teoria

Com a finalidade de se comparar os resultados obtidos para a condutância térmica de contato, pelo procedimento experimental desenvolvido, com valores teóricos, utilizou-se o modelo de ROSS e STOUTE (1962) /36./ para o cálculo desses valores.

Entretanto, foram consideradas algumas simplificações que resultaram numa expressão mais simples que a aquela apresentada no trabalho original.

A expressão resultante, que foi utilizada para efeito de comparação dos resultados é a seguinte:

$$h = \frac{k_m}{A_o R^{1/2} H} P + \frac{k_g}{C(R_1 + P_2)} \quad (4.1)$$

onde:

- k_m é a condutibilidade térmica do material sólido;
- k_g é a condutibilidade térmica do fluido contido na interface;
- A_o é uma constante ($= 1 \text{ cm}^{1/2}$);
- R é a média das rugosidades das superfícies;
- P é a pressão de contato na interface;
- H é a dureza Meyer, em unidades de pressão;
- C é um fator que depende da pressão de contato ($C = 2,75 - 0,00259 P$, P em kgf/cm^2);
- R_1 e P_2 são as rugosidades médias das superfícies de contato ($R_i = \sigma (2/\pi)^{1/2}$);

O primeiro termo da Eq. (4.1) representa a contribuição devida à transmissão de calor através do contato sólido-sólido, ou seja, através dos pontos de contato definidos pelos picos de rugosidade das superfícies em contato, e o segundo termo representa a parcela devida à

transferência de calor através do fluido contido na interface de separação das pastilhas.

Os valores obtidos são apresentados e comparados com os resultados experimentais, na Tab.(4.4).

Da análise desses resultados observou se que a parcela relacionada com o coeficiente de transmissão de calor através do fluido é muito mais significativa - que a parcela referente ao coeficiente de transmissão através dos contatos sólidos.

Conclui-se, portanto, que os valores de condutância de contato medidos experimentalmente, representam o coeficiente de transmissão de calor através do fluido existente na interface de separação das duas pastilhas de Ferro Eletrolítico-734.

No entanto, a teoria na fornece meios para se explicar a pequena variação nos valores de condutância de contato, em função da pressão na interface.

TABELA (4.4) - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA CONDUTÂNCIA DE CONTATO

AMOSTRA	RUGOSIDADES		PRESSÃO (kgf/cm ²)	CONDUTÂNCIA DE CONTATO - (Cal/cm ² .s. C)	TOTAL			
	Experi- mento	Past.1 (cm)				Past.2 (cm)	Experimental	$(k_m/A_o P) P/H$
0,026	1 - 1	2,78X10 ⁻⁵	3,51X10 ⁻⁵	5,1	0,227	0,016	0,359	0,375
	2	2,78X10 ⁻⁵	3,51X10 ⁻⁵	6,7	0,289	0,021	0,360	0,381
	3	2,78X10 ⁻⁵	3,51X10 ⁻⁵	8,3	0,314	0,025	0,361	0,386
	4	2,78X10 ⁻⁵	3,51X10 ⁻⁵	9,5	0,362	0,029	0,361	0,390
	5	2,78X10 ⁻⁵	3,51X10 ⁻⁵	10,8	0,398	0,032	0,362	0,395
	6	2,78X10 ⁻⁵	3,51X10 ⁻⁵	12,1	0,400	0,037	0,362	0,399
0,030	2 - 1	3,12X10 ⁻⁵	3,99X10 ⁻⁵	5,1	0,248	0,015	0,319	0,334
	2	3,12X10 ⁻⁵	3,99X10 ⁻⁵	6,7	0,280	0,019	0,319	0,338
	3	3,12X10 ⁻⁵	3,99X10 ⁻⁵	8,3	0,303	0,024	0,320	0,342
	4	3,12X10 ⁻⁵	3,99X10 ⁻⁵	9,5	0,326	0,027	0,320	0,347
	5	3,12X10 ⁻⁵	3,99X10 ⁻⁵	10,8	0,350	0,031	0,320	0,351
	6	3,12X10 ⁻⁵	3,99X10 ⁻⁵	12,8	0,375	0,035	0,321	0,356
0,101	3 - 1	3,78X10 ⁻⁵	3,20X10 ⁻⁵	5,1	0,251	0,015	0,326	0,341
	2	3,78X10 ⁻⁵	3,20X10 ⁻⁵	6,7	0,293	0,020	0,326	0,346
	3	3,78X10 ⁻⁵	3,20X10 ⁻⁵	8,3	0,309	0,024	0,327	0,351
	4	3,78X10 ⁻⁵	3,20X10 ⁻⁵	9,5	0,323	0,028	0,327	0,356
	5	3,78X10 ⁻⁵	3,20X10 ⁻⁵	10,8	0,337	0,031	0,327	0,359
	6	3,78X10 ⁻⁵	3,20X10 ⁻⁵	12,1	0,360	0,035	0,328	0,363

5. - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

O parâmetro h , relacionado com a condutância de contato, foi estimado por meio de ajuste por mínimos quadrados, pelo programa "AJUST2". A convergência deste programa foi sempre muito rápida, mesmo para valores iniciais do parâmetro de entrada bastante afastados do valor ajustado.

As principais conclusões tiradas deste trabalho podem ser resumidas na seguinte forma:

a) O valor da condutância de contato cresce com o aumento da pressão de contato na interface. Tal resultado era esperado, uma vez que o aumento da pressão de contato acarreta melhor contato entre as pastilhas e, portanto, provoca uma diminuição da resistência ao fluxo de calor na interface.

b) Para a mesma pressão de contato na interface, o valor da condutância de contato decresce com o aumento da espessura das pastilhas. Isto ocorre porque, aumentando a espessura da pastilha, aumenta-se a relação espessura/diâmetro e, portanto, as perdas de calor na direção radial também aumentam.

c) A condutância de contato mostrou-se praticamente independente da energia do feixe de laser, observando-se apenas pequenas variações no seu valor, quando se altera a energia do feixe.

d) A parcela referente ao coeficiente de transmissão de calor através do fluido contido na interface é muito mais significativa do que a parcela referente ao coeficiente de transmissão de calor através dos contatos sólidos.

e) Os valores medidos representam o coeficiente de troca de calor através do fluido contido na interface de separação das duas pastilhas de Ferro Eletrolítico-734.

f) A teoria não fornece elementos suficientes para explicar o fato de que a dependência dos valores de condutância de contato com a pressão de contato na interface é muito pequena para a faixa de pressões utilizada nos experimentos.

5.2 - Sugestões Para Trabalhos Futuros

Comos principais temas para trabalhos futuros têm-se:

1) Estudar os efeitos de perdas de calor na determinação da condutância de contato pela Técnica de Pulso de Energia, uma vez que no presente trabalho tais efeitos não foram considerados.

2) Determinar o valor da condutância de contato na interface de amostras colocadas em ambiente onde o fluido contido na interface não é o ar. Pode-se também, fazer um estudo da dependência desse valor com a pressão do fluido.

3) Estudar a influência do acabamento superficial das amostras no valor da condutância de contato. Este fator é bastante relevante na determinação de tal parâmetro.

4) Utilizar, para a determinação da condutância térmica de contato, pelo procedimento experimental desenvolvido para este trabalho, pastilhas de materiais diferentes. Neste caso, pode-se estudar, também, o chamado efeito direcional, trocando de posição, a amostra que recebe o pulso de laser. A utilização de materiais distintos é importante, pois nos reatores nucleares tem-se a transferência de calor do UO_2 para o zircaloy.

APÊNDICE A - FORMA E ENERGIA DO FEIXE DE LASER

Os pulsos de energia empregados neste trabalho foram providos por laser não contínuo, com níveis de energia variáveis, de 0 a 40 joules.

A.1 - Forma dos Pulsos de Laser

A Fig.(A.1) mostra a forma dos pulsos de energia para as tensões utilizadas no experimentos, de 1900, 2100 e 2300 VDC, providas às lâmpadas-flash de xenônio.

Pode-se observar que um aumento na tensão de alimentação das lâmpadas-flash provoca um alargamento dos pulsos (0,69 ms para 1900 VDC; 0,83 ms para 2100 VDC; 0,96 ms para 2300 VDC).

A.2 - Energia do Feixe de Laser

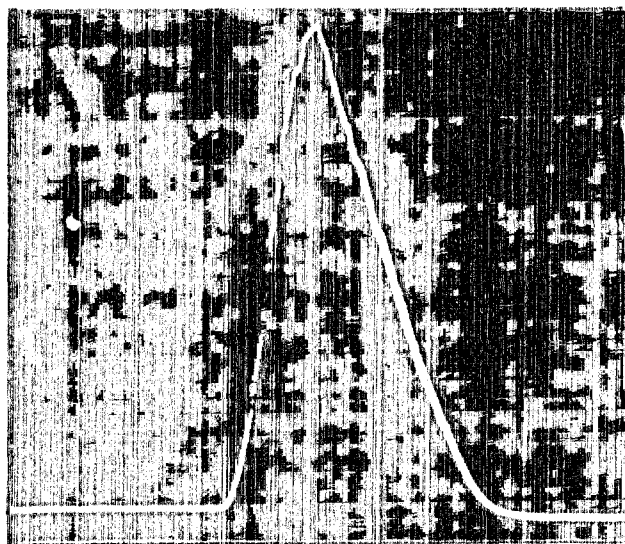
A energia do feixe de laser varia em função da tensão da bateria de capacitores, ou seja, da tensão fornecida às lâmpadas-flash de xenônio que estimulam o material laser.

A correspondência entre a energia do feixe de laser e a tensão de alimentação das lâmpadas-flash

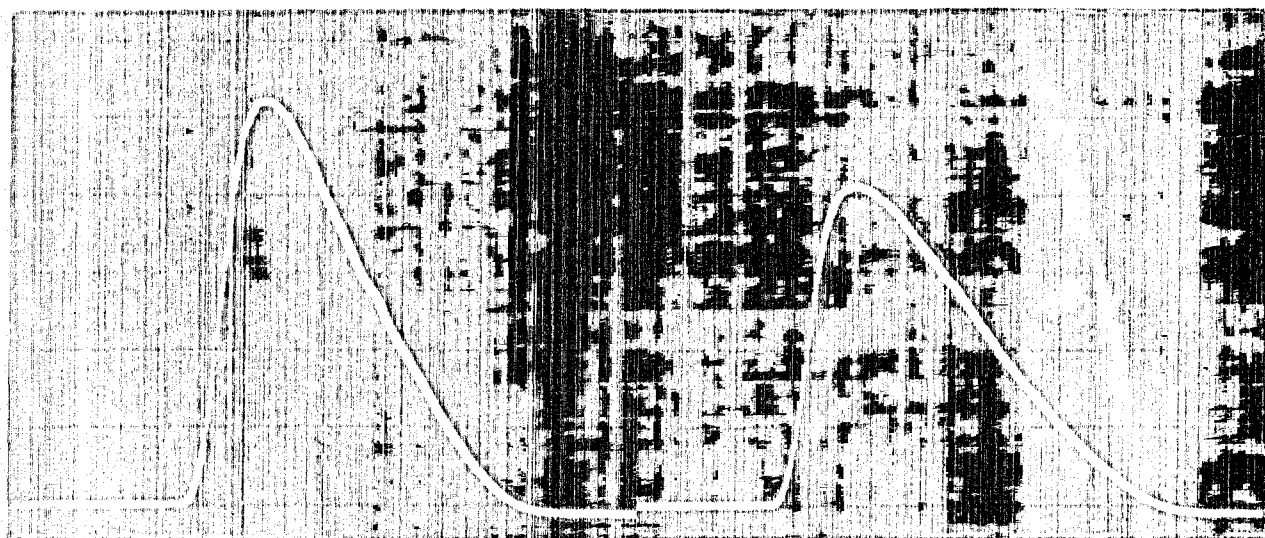
é mostrada na tabela (A.1).

TABELA (A.1) - Correspondência entre a tensão fornecida às lâmpadas-flash e a energia do feixe de laser.

TENSÃO (VDC)	ENERGIA (J)
1900	9
2100	18
2300	29



(a)



(b)

(c)

FIG. (A.1) - Forma dos Pulsos de Laser

Escala: (a)-Horiz. = 0,2 ms/div.; Vert. = 2 V/div.

(b)-Horiz. = 0,2 ms/div.; Vert. = 5 V/div.

(c)-Horiz. = 0,2 ms/div.; Vert. = 10 V/div.

(a) - 1900 VDC; (b) - 2100 VDC; (c) - 2300 VDC

APÊNDICE B - PROGRAMAS "CONDUT" E "AJUST2"

Os programas "CONDUT" e "AJUST2", escritos em FORTRAN IV, foram desenvolvidos especialmente para as finalidades deste trabalho.

O programa "CONDUT" serve especificamente para fazer a leitura do transiente de temperatura resultante na face posterior da amostra, ou seja, fazer a leitura do sinal fornecido pelo termopar, e registrá-lo em disco, na forma de uma sequência de pontos.

O programa "AJUST2" processa esses - pontos, isto é, ajusta-os por uma função teórica e calcula o valor da condutância de contato. Este programa funciona - como uma subrotina e é chamado pelo programa "CONDUT". Esta chamada ocorre em dois casos:

- a) quando se deseja processar os pontos imediatamente após cada leitura;
- b) quando se deseja repetir o processamento de um de - terminado conjunto de pontos já registrados.

Tal estrutura permite as seguintes - alternativas:

- i) processar o mesmo conjunto de pontos quantas vezes se desejar;
- ii) fazer várias leituras sem o processamento imediato

dos pontos registrados.

São dados de entrada para o programa "CONDUT", os seguintes parâmetros:

- a) o ganho do conversor Analógico-Digital;
- b) o canal de leitura do conversor Analógico-Digital;
- c) o número de leituras;
- d) o passo, que determina quantos pontos devem ser grvados no disco.

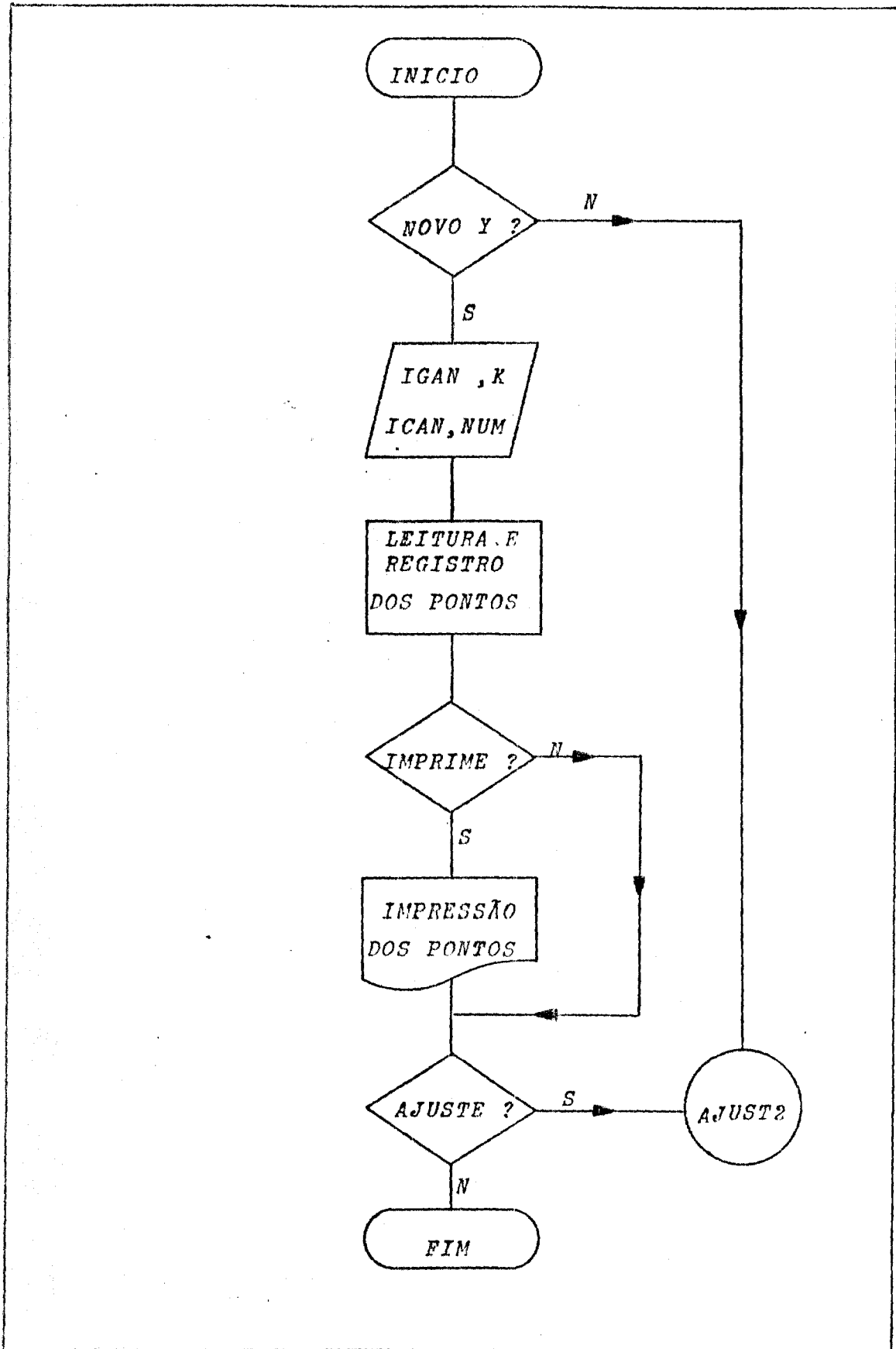
Para o programa "AJUST2", são os seguintes os parâmetros de entrada:

- a) a estimativa inicial para a condutância de contato;
- b) a estimativa inicial para o autovalor B;
- c) a espessura da pastilha;
- d) o tempo para o qual a amplitude do pulso de energia é máxima;
- e) o número de pontos experimentais a serem processa-dos;
- f) o intervalo de tempo entre cada ponto experimental.

Os diagramas de blocos para os programas "CONDUT" e "AJUST2" são apresentados, respectivamente, nas Fig. (B.1) e (B.2).

A Tab.(B.1) contém a equivalência dos símbolos utilizados nos programas FORTRAN.

Em seguida são apresentadas, também,
as listagens dos programas computacionais "CONDUT" e -
"AJUST2".



FIG(B.1) - Diagrama de Blocos para o programa "CONDUT"

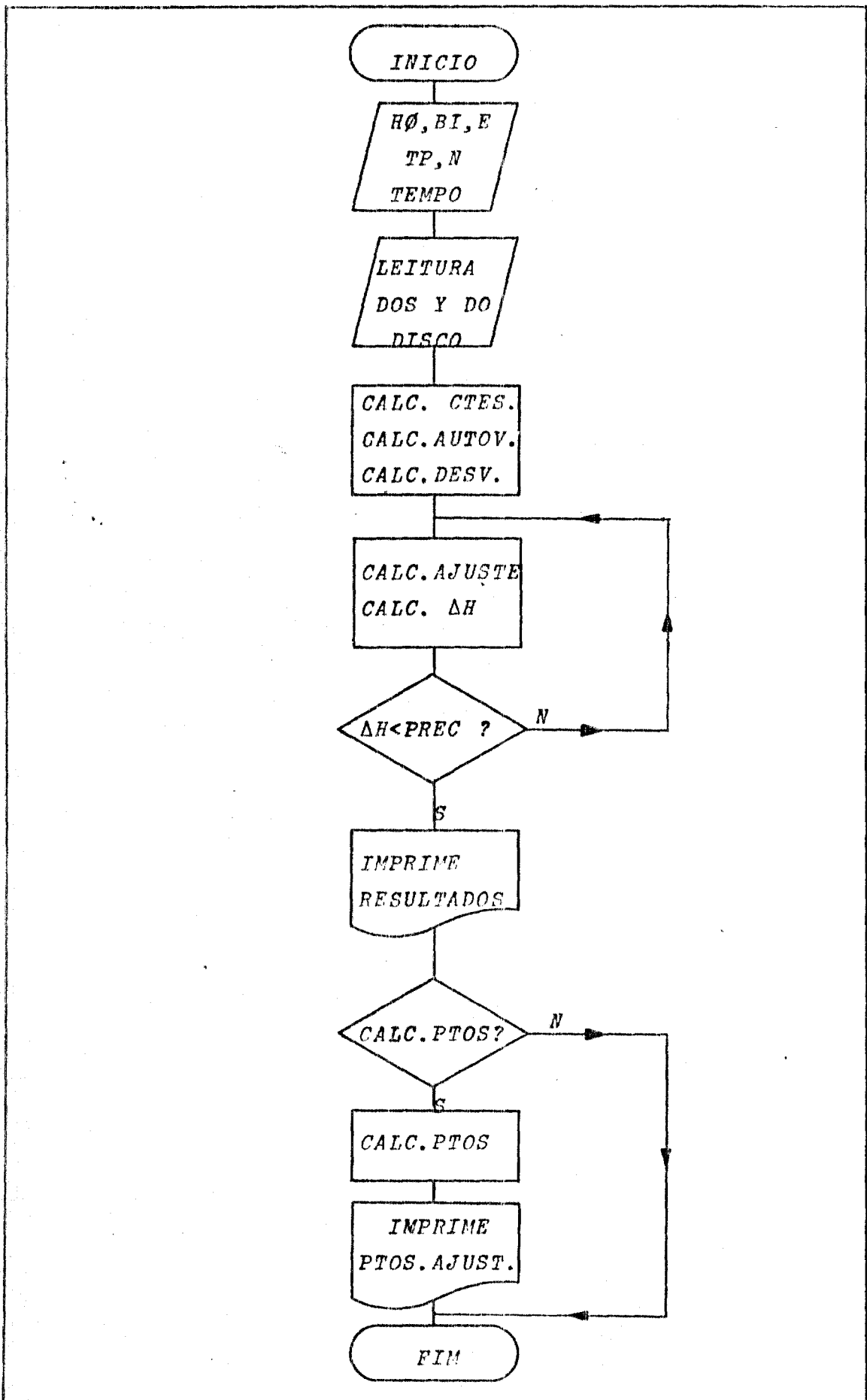


FIG. (B.2) - Diagrama de Blocos para o Programa "AJUST2"

TABELA (B.1) - EQUIVALÊNCIA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS NOS PROGRAMAS FORTRAN

SÍMBOLO	SÍMB. FORTRAN	UNIDADES	OBSERVAÇÕES
y	Y	-	Ponto experimental
-	K	-	Passo
-	IGAN	-	Fator de escala do Conversor A/D
-	ICAN	-	Canal de Leitura do Conversor A/D
n	NUM	-	Número de leituras
t	T	s	
β	BETA	-	Autovalor
β_i	BI	-	Estimativa inicial para o autovalor β
h_o	HØ	cal/cm ² s ^o C	Estimativa inicial para a condutância térmica de contato
λ	E	cm	Espessura da pastilha
t_p	TP	s	Tempo para o qual a amplitude do pulso de energia é máxima

TABELA (B.1) - Continuação.

SÍMBOLO	SÍMB. FORTRAN	UNIDADES	OBSERVAÇÕES
n'	N	-	Número de pontos a ajustar
Δt	TEMPO	s	Intervalo de tempo entre cada ponto
k'	CT	cal/cm s ⁰ C	Condutibilidade térmica do material
α	ALFA	cm ² /s	Difusividade térmica do material
T_{∞}	YMAX	-	Valor máximo do transiente de temperatura
θ	TETA	s	Tempo de difusão do calor na amostra
γ	GAMA	-	Parâmetro relacionado com a forma do pulso
$\sqrt{\gamma}$	RQG	-	-
$\cos(\sqrt{\gamma})$	CØ	-	-
$\text{sen}(\sqrt{\gamma})$	C1	-	-
k/l	C2	cal/cm ² s ⁰ C	-
$\sqrt{\gamma}k/l$	C3	cal/cm ² s ⁰ C	-

TABELA (B.1) - Continuação.

SÍMBOLO	SÍMB. FORTRAN	UNIDADES	OBSERVAÇÕES
$\gamma k/l$	C4	$cal/cm^2 s^0 C$	-
$\gamma^2 k/l$	C5	$cal/cm^2 s^0 C$	-
α/l^2	C6	s^{-1}	-
$\gamma\alpha/l^2$	C8	s^{-1}	-
h	H	$cal/cm^2 s^0 C$	Condutância térmica de contato
$2hl/k$	C9	cm^{-3}	-
$tg(\beta_0)$	TGBØ	-	-
$cos(\beta_0)$	COSBØ	-	-
$f(\beta)$	FBETA	-	Função do autovalor Beta (β)
$\partial f(\beta)/\partial \beta$	DBETA	-	-
$\gamma - \beta^2$	C7	-	-
-	FUNC	-	Função de ajuste
-	DERIV	-	Derivada da função FUNC
-	DMQ	-	Desvios médios quadráticos do ajuste

TABELA (B.1) - Continuação.

SÍMBOLO	SÍMB. FOPTRAN	UNIDADES	OBSERVAÇÕES
Δh	DH	cal/cm ² s ⁰ C	Incremento no valor de h ajustado
-	FUNCAJ	-	Pontos ajustados

```

C      PROGRAMA 42 PARA LEITURA DO TRANSIENTE DE TEMPERATURA
C      CONDUCTANCIA DE CONTATO - "CONDUCT"
      INTEGER STS(5), IBUF(1000)
      LOGICAL*1 C(72)
      COMMON Y(1000)
      CALL ERASE
      WRITE(6,10)
10     FORMAT(20X, '*** CONDUCTANCIA DE CONTATO ***', //)
      WRITE(6,20)
20     FORMAT(1X, 'QUER NOVOS VALORES: SIM(S) OU NAO(N) ? ')
      CALL BELL
      READ(6,30)C
30     FORMAT(72A1)
      " 123 " CORRESPONDE A RESPOSTA "SIM"
      " 116 " CORRESPONDE A RESPOSTA "NAO"
      IF(C(1).EQ."123")GO TO 40
      IF(C(1).EQ."116")GO TO 140
40     WRITE(6,45)
45     FORMAT(1X, 'QUAL O VALOR DO PASSO K ? ')
      CALL BELL
      READ(6,50)C
      P = 0
      CALL INTFF(P,C,72,K)
      WRITE(6,50)
50     FORMAT(1X, 'QUAL O GANHO E O CANAL ? ')
      CALL BELL
      READ(6,30)C
      P=0
      CALL INTFF(P,C,72,IGAN)
      CALL INTFF(P,C,72,ICAN)
      WRITE(6,60)
60     FORMAT(1X, 'QUAL O NUMERO DE LEITURAS ? ')
      CALL BELL
      P=0
      READ(6,30)C
      CALL INTFF(P,C,72,NUM)
      CALL INITAD(STS)

```



```

SCALE=10. / (2. ** IGMN)
I=0
70 I=I+1
CALL ADF(2, 1, 0, IGMN, ICMN, 0, IEUF(I), 0, 0, STS)
CALL ADFRDY
IF(I. GE. NUM) GO TO 80
GO TO 70
80 DO 90 I=1, NUM, K
Y(I)=(FLOAT(IEUF(I))/4096.)*SCALE
90 CONTINUE
C ARMAZENAMENTO DOS PONTOS EXPERIMENTAIS NO DISCO
DO 110 I=1, NUM, K
WRITE(4, 100, END=120)Y(I)
100 FORMAT(F8.5)
CONTINUE
CALL CLOSE(4)
WRITE(6, 121)
121 FORMAT(1X, 'OS PONTOS SERAO IMPRESSOS: SIM(S) OU NAO(N) ?' )
CALL BELL
READ(6, 30) C
IF(C(1). EQ. '123) GO TO 122
IF(C(1). EQ. '116) GO TO 131
C REGISTRO DOS PONTOS EXPERIMENTAIS
WRITE(5, 125)
125 FORMAT(1X, '/', 25X, ' ** PONTOS EXPERIMENTAIS **', '/')
WRITE(5, 130)Y(I), I=1, NUM, K)
130 FORMAT(1X, 7(2X, F8.5))
131 WRITE(6, 135)
135 FORMAT(/, 1X, 'OS PONTOS SERAO PROCESSADOS ? SIM(S) OU NAO(N)')
CALL BELL
READ(6, 30) C
IF(C(1). EQ. '123) GO TO 140
IF(C(1). EQ. '116) GO TO 145
CALL AUGUST2(NUM)
140 STOP
145 END

```

```

SUBROUTINE AJUST2(N)
PROGRAMA # 2 PARA AJUSTE DE PONTOS EXPERIMENTAIS
ESTE PROGRAMA FAZ O AJUSTE DOS PONTOS EXPERIMENTAIS PELO
METODO DE MINIMOS QUADRADOS
LOGICAL*1 C(72)
DIMENSION A(6), H1(50), T(700), FUNCAJ(700), BETA(5)
COMMON Y(1000)
WRITE (6,10)
10  FORMAT(15X, '*** AJUSTE DOS PONTOS EXPERIMENTAIS ***',/)
20  WRITE(6,30)
30  FORMAT(1X, 'QUAIS OS VALORES DE H0, B1, E, TP, N , TEMPO ? ',/)
CALL BELL
READ(6,40)C
40  FORMAT(72H1)
P=0
DO 50 I=1,6
CALL REALFF(P,C,72,A(I))
50  CONTINUE
'H0' E A ESTIMATIVA INICIAL PARA A CONDUTANCIA DE CONTATO
[CAL/CM2.SEG.C]
H0 = A(1)
'B1' E A ESTIMATIVA INICIAL PARA O AUTOVALOR BETA
B1 = A(2)
'E' E A SEMI-ESPESURA DA AMOSTRA- [CM]
E = A(3)
'TP' E O TEMPO P/ O QUAL A AMPLITUDE DO PULSO DE CALOR E MAXIMA
[SEG.]
TP = A(4)
'N' E O NUMERO DE PONTOS EXPERIMENTAIS
N = A(5)
'TEMPO' E O INTERVALO DE TEMPO ENTRE CADA FONTO [SEG.]
TEMPO = A(6)
'CT' E A CONDUTIBILIDADE TERMICA DO FERRO ELETROLITICO-734
[CAL/CM.SEG.C]
CT = .189

```

```

C "ALFA" E A DIFUSIVIDADE TERMICA DO FERRO ELETROLITICO-734
C LCM2/SEGJ
C ALFA = .181
C LEITURA DOS PONTOS EXPERIMENTAIS ARMAZENADOS NO DISCO
C DO 70 I=1,N
C READ(4,60,END=80) Y(I)
C FORMAT(F8.5)
C CONTINUE
C VERIFICACAO DO VALOR MAXIMO DO TRANSIENTE DE TEMPERATURA
C YMAX = Y(1)
C DO 90 I=2,N
C IF(Y(I).GE. YMAX) YMAX = Y(I)
C CONTINUE
C CALCULO DE VALORES CONSTANTES
C H1(1) = H0
C J = 1
C "TETA" E O TEMPO DE DIFUSAO DO CALOR NA AMOSTRA
C TETA = E*E/ALFA
C "GAMA" E UM PARAMETRO DE FORMA DE PULSO
C GAMA = TETA/TP
C R0G = SQRT(GAMA)
C C0 = COS(R0G)
C C1 = SIN(R0G)
C C2 = CT/E
C C3 = C2*R0G
C C4 = C3*R0G
C C5 = C4*GAMA
C C6 = ALFA/(E*E)
C C8 = GAMA*C6
C H = H1(J)
C C9 = H*E*G. /CT
C CALCULO DOS AUTOVALORES BETA(K) PELO METODO DE NEWTON
C B0 = 81
C M = 1
C TGB0 = SIN(B0)/COS(B0)

```

```

COSB0 = COS(B0)
FBETA = B0*TB00 - C9
CBETA = TB00 + B0/(COSB0+COSB0)
B1 = B0 - FBETA/DBETA
TB01 = SIN(B1)/COS(B1)
FB1 = B1*TB01 - C9
IF(ABS(FB1).LT..001) GO TO 110
B0 = B1
GO TO 100
110 BETA(M) = B1
B0 = BETA(M) + 3.2
M = M + 1
IF(M.LE.5) GO TO 100
CALCULO DA SOMA DOS DESVIOS MEDIOS QUADRATICOS - SOMO
AUX1 = C0*C1*(1. - C4/H)
AUX2 = C0*C1 - C3*C1*C1/(H*2.)
AUX3 = C0*C0 - C1*C1 - C3*C1*C1/H
AUX4 = C4*C1*C1/(H*H)
AUX5 = 2.*C0*C1 - C3*C1*C1/H
AUX6 = (C0 + C1)*C4*C1/(H*H)
AUX7 = R00 / AUX5
AUX8 = (AUX1 + R00*AUX3)/AUX2
AUX9 = AUX4/(AUX5*AUX5)
AUX10 = (AUX1 + AUX3*AUX4 / 2.)/(AUX2*AUX2)
AUX11 = AUX8*AUX9
AUX12 = AUX6 / AUX2
SOMO = 0
DERIV2 = 0
FUNC3 = 0
GO 130 I=1,N
TVI) =-FLOAT(I)*TEMPD
SOM1 = 0
SOM2 = 0
GO 125 M=1,5
CY = GAMMA - BETA(M)*BETA(M)

```

120

```

A2 = C7*C7
A31= COS(BETA(M))
A32= SIN(BETA(M))
A3 = A31*A31 - A32*A32
A4 = A32*A32 + A31*A32*BETA(M)*2.
A1 = EXP(-C5*BETA(M)*BETA(M)*T(I))
AUX13 = A3 - C2*A4/(H*2.)
AUX14 = A1/(AUX13*A2)
S1 = AUX14
S2 = AUX14*A4/AUX13
SOM1 = SOM1 + S1
SOM2 = SOM2 + S2
125 CONTINUE
C "SFUNC" E A SOMATORIA NA FUNCAO DE AJUSTE
SFUNC = 2.*GAMA*GAMA*SOM1
C "SDERIV" E A SOMATORIA NA DERIVADA DA FUNCAO DE AJUSTE
SDERIV = -C5*SOM2/(H*H)
A5 = EXP(-C8*T(I))
A6 = T(I)*2./TP
C "FUNC" E A FUNCAO DE AJUSTE
FUNC = 1. + SFUNC - A5*AUX7*(A6 + AUX8)
FUNCI = FUNC - Y(I)/YMAX
SOMCI = FUNC1*FUNCI/N
C "SOMQ" E O DESVIO MEDIO QUADRATICO
SOMQ = SOMQ + SOMCI
C CALCULO DA DERIVADA EM RELACAO AO PARAMETRO H
DERIV = SDERIV + A5*(A6*AUX8 + AUX11 - AUX12*AUX7 + AUX7*AUX10)
DERIV1 = DERIV*DERIV
DERIV2 = DERIV2 + DERIV1
FUNCI2 = FUNCI*DERIV
FUNCI3 = FUNCI + FUNCI2
130 CONTINUE
C CALCULO DO INCREMENTO DO PARAMETRO H - "DH"
C "DH" - DELTA H - E O INCREMENTO DO PARAMETRO H
DH = FUNC3/DERIV2

```

```

IF(ABS(DH).LE.0001) GO TO 140
IF(J.GE.30) GO TO 155
H1(J+1) = H1(J) + DH
J = J+1
GO TO 95
C
140
REGISTRO DOS DADOS DE ENTRADA
WRITE(5,185)
WRITE(5,178) H0
WRITE(5,180) B1
WRITE(5,190) E
WRITE(5,200) TP
WRITE(5,210) N
WRITE(5,215) TEMPO
REGISTRO DOS RESULTADOS DO AJUSTE
WRITE(5,220)
WRITE(5,230) H
WRITE(5,240) SOMA
GO TO 160
155
WRITE(6,270)
WRITE(6,280) H1(J), BETA(1)
CALL BELL
GO TO 20
CONTINUE
C
160
CALCULO DOS PONTOS AJUSTADOS
WRITE(6,141)
FORMAT(1X, / OS PONTOS SERAO CALCULADOS: SIM(S) OU NAO(N) ? /)
CALL BELL
READ(6,40)C
" 123 " CORRESPONDE A RESPOSTA AFIRMATIVA "SIM"
" 116 " CORRESPONDE A RESPOSTA NEGATIVA "NAO"
C
141
IF(C(1).EQ."123") GO TO 142
IF(C(1).EQ."116") GO TO 298
CONTINUE
DO 150 I=1,N
T(I) = FLOAT(I)*TEMPO

```

```

145 A5 = EXP(-C6*(I))
    A6 = T(I)*2./TP
    SOMF = 0
    DO 145 M=1.5
    C7 = GAMA - BETA(M)*BETA(M)
    A2 = C7*C7
    A31= COS(BETA(M))
    A32= SIN(BETA(M))
    A3 = A31*A31 - A32*A32
    A4 = A32*A32 + A31*A32*BETA(M)*2.
    A1 = EXP(-C6*BETA(M))*BETA(M)*T(I)
    AUX1 = A2*(A3 - C2*A4/(H*2.))
    AUX2 = A1/AUX1
    SOMF = SOMF + AUX2
    CONTINUE
    SFUNC = 2.*GAMA*GAMA*SOMF
    "FUNCAJ(I)" E A FUNCAO AJUSTADA CALCULADA NO PONTO "I"
    FUNCAJ(I) = (1. + SFUNC - A5*ROG*(A6 + AUX2)/AUX5)*YMAX
150 CONTINUE
    C
    REGISTRO DOS PONTOS AJUSTADOS
153 WRITE(5,250)
    WRITE(5,260) (FUNCAJ(I),I=1,N)
    GO TO 290
165 FORMAT(//,20X,'*** DADOS DE ENTRADA ***',//)
170 FORMAT(15X,'ESTIMATIVA INICIAL PARA H : ', H0 = 'F3.2,')
180 FORMAT(15X,'ESTIMATIVA INICIAL PARA BETA : ', B1 = 'F3.2,')
190 FORMAT(15X,'SEMI-ESPESURA DA AMOSTRA : ', E = 'F4.3,')
200 FORMAT(15X,'TEMPO DE PULSO : ', TP = 'F6.5,')
210 FORMAT(15X,'NUMERO DE PONTOS EXPERIMENT. : ', N = 'I3,')
215 FORMAT(15X,'INTERVALO TEMPO ENTRE PONTOS : TEMPO= ', F5.3,//)
220 FORMAT(20X,'*** RESULTADOS DO AJUSTE ***',//)
230 FORMAT(15X,'CONDUTANCIA DE CONTRAIO : N =',F6.3, DEL/CORR. S. D',//)
240 FORMAT(15X,'DESVIO MEDIO QUADRATICO : ',F7.5,//)
250 FORMAT(//,20X,'*** PONTOS AJUSTADOS ***',//)
260 FORMAT(1X,7(1X,F7.4))

```

```
270  FORMAT(1X)  NUMERO DE ITERACOES EXCEDE O ESPERADO(//)
280  FORMAT(1X)  2(1X) F(1.3))
290  CONTINUE
      RETURN
      END
```


APÊNDICE C - ESTIMATIVA DO ERRO EXPERIMENTAL

As principais fontes de erro que afetaram as medidas da condutância de contato foram classificadas em três categorias :

- i) erros devidos ao procedimento experimental utilizado para a detecção do transiente de temperatura;
- ii) erros na medida da energia do feixe de laser;
- iii) erros inerentes ao procedimento de análise por mínimos quadrados.

C.1 - Erros Devidos ao Procedimento Experimental Utilizado Para a Detecção do Transiente de Temperatura

Estes erros foram divididos em três tipos:

- a) erro do termopar : $\pm 1,0\%$
- b) erro da amplificação : $\pm 2,4\%$
- c) erro do conversor A/D : $\pm 0,1\%$

A influência de tais erros foi levada em conta, na determinação da condutância de contato, processando-se o programa "AJUST2" com a curva de pontos experimentais afetada pelos referidos desvios. Como resultado, ob

tiveram-se erros de $\pm 3,52\%$ na condutância de contato.

C.2 - Erros na Medida da Energia do Feixe de Laser

A energia do feixe de laser é caracte-
rizada pela tensão provida às lâmpadas-flash de xenônio que
excitam o material laser.

Considerou-se um desvio de $\pm 1,0\%$ as-
sociado à tensão e, portanto, à energia do feixe. Tal des-
vio produziu um erro de $\pm 0,12\%$ nas medidas da condutância
de contato. Estes erros foram estimados pelo programa -
"AJUST2", para a amostra de 0,099 cm de espessura, à pres-
são de contato na interface de 10,8 Kgf/cm².

C.3 - Erros Inerentes ao Procedimento de Análise Por Míni- mos Quadrados

O erro devido ao procedimento de aná-
lise por mínimos quadrados foi estimado pelo programa compu-
tacional "AJUST2", para o parâmetro h , para a espessura de
0,099 cm, à pressão de contato na interface de 10,8 Kgf/cm²,
e tensão de 1900 VDC, em $\pm 0,023\%$. No entanto, deve ser con-
siderado também, o erro na medição da espessura das pasti-
lhas. Neste trabalho, tais espessuras foram medidas com um
micrômetro, Mitutoyo, Modelo M 110-25, com precisão de $\pm 0,01$
mm. Portanto, obtiveram-se, associados ao procedimento de -
análise por mínimos quadrados, erros de $\pm 1,26\%$ na medida -

da condutância de contato.

C.4 - Erros Inerentes ao Cálculo da Pressão de Contato Entre as Pastilhas

Estes erros foram classificados em dois tipos:

- a) Erros nas medidas dos pesos : $\pm 0,2\%$
- b) Erros nas medidas dos diâmetros das pastilhas:
 $\pm 0,89\%$

Tais erros provocaram, portanto, desvios de $\pm 2,01\%$ no cálculo da pressão de contato na interface. Convém ressaltar, porém, que o parâmetro h é calculado por meio de uma expressão independente da pressão. Portanto, os valores de condutância de contato obtidos, não são afetados por tais erros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARFKEN, G. Mathematical Methods for Physicists. 2^a. Ed., New York, Academic Press, 1970.
2. ASCOLI, A. e GERMAGNOLI, E. Considerazioni sulla resistenza termica di contatto tra superficie metalliche piane affacciate. Energia Nucl., Milano, 3(2): 113-118, 1956.
3. BAKER, D.E. Thermal conductivity of irradiated graphite by a rapid thermal-pulse method. J. nucl. Mater., Amsterdam, 12(1):120-124, 1964.
4. BENDAT, J.S. e PIERSOL, A.G. Random Data: Analysis and Measurements Procedures. New York, Interscience, 1971.
5. BOESCHOTEN, F. e VAN DER HELD, E.F.M. The thermal conductance of contacts between aluminium and other metals. Physica, Amsterdam, 23:37-44, 1957.
6. CAPE, J.A. e LEHMAN, G.W. Temperature and finite pulse time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. J. appl. Phys., Lancaster, Pa., 34(7):1909-1913, July 1963.
7. CARSLAW, H.S. e JAEGGER, J.C. Conduction of Heat in Solids. 2^a. Ed., London, Oxford Univ. Press, 1959.

8. CETINKALE, T.H. e FISHENDEN, M. *Thermal conductance of metal surfaces in contact.* Int. Conf. of Heat Transfer, Inst. Mech. Eng., London, :271-275, 1951.
9. CLAUSING, A.M. e CHAO, B.T. *Thermal contact resistance in a vacuum environment.* J. Heat Transfer, New York, 87:243-251, 1965.
10. COOPER, M.G. ; MIKIC, B.B. e YOVANOVICH, M.M. *Thermal contact conductance.* Int. J. Heat Mass Transfer, Oxford, 12:279-300, 1969.
11. COSTA, G.J.S. Efeitos de Perdas de Calor na Determinação da Difusividade Térmica Pela Técnica de Pulso de Energia. São Paulo, 1977. (Dissertação de Mestrado)
12. DEEM, H.W. e WOOD, W.D. *Flash thermal diffusivity measurements using a laser.* Rev. scient. Instrum., New York, 33(10):1107-1109, Oct. 1962.
13. EL WAKIL, M.M. Nuclear Heat Transport. New York, - Int. Textbook Co., 1971, p.183.
14. FENECH, H. e ROHSENOW, W.M. Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact. Cambridge, Mass., - United States Atomic Energy Commission, May 1959: (NYO-2136)
15. HENRY, J.J. e FENECH, H. *The use of analog computers for determining surface parameters required for prediction of thermal contact conductance.* J. Heat Transfer, New York, 86:543-551, 1964.

16. HOLMAN, J.P. Experimental Methods for Engineers. 1². Ed., New York, McGraw-Hill Book Co., 1966.
17. JACOBS, G. e TODREAS, N. Thermal contact conductance in reactor fuel elements. Nucl. Sci. Engng., Hinsdale, Ill., 50:283-306, 1973.
18. JENKINS, R.J. e WESTOVER, R.W. Thermal diffusivity of stainless-steel from 20 to 1000 °C. J. chem. Engng. Data, Washington, D.C., 7(3):434-437, July 1962.
19. LARSON, K.B. e KOYAMA, K. Correction for finite pulse time effects in very thin samples using the flash method of measuring thermal diffusivity. J. appl. Phys., Lancaster, Pa., 38(2):465-474, Feb. 1967.
20. LARSON, K.B. e KOYAMA, K. Measurement by the flash method of thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity in two-layer composite samples. J. appl. Phys., Lancaster, Pa., 39(9):4408-4416, Aug. 1968.
21. LEWIS, D.V. e PERKINS, H.C. Heat transfer at the interface of stainless-steel and aluminium - the influence of surface conditions on the directional effect. Int. J. Heat Mass Transfer, Oxford, 11:1371-1383, 1968.

22. McCALLA, T.R. Introduction to Numerical Methods and FORTRAN Programming. New York, John Wiley & Sons, 1967.
23. MIKIC, B.B. Thermal contact conductance : theoretical considerations. Int. J. Heat Mass Transfer, - Oxford, 17:205-214, 1974.
- 23a. MORRISON, B.H. ; KLEIN, D.J. e COWDER, L.R. A parametric study of flash thermal diffusivity measurements. Proc. 6th. conf. on termal conductivity, - Oct. 19-21, 1966 apud TOULOUKIAN, Y.S. et alli. - Thermal Diffusivity, New York, Plenum, 1973. (Thermophysical properties of matter, v.10). p.654.
24. MOSER, J.B. e KRUGER, O.L. Heat pulse measurements on uranium compounds. J. nucl. Mater., Amsterdam, 17:153-158, 1965.
25. MOSER, J.B. e KRUGER, O.L. Thermal conductivity and heat capacity of the mono-carbide, monophosphide, - and monosulfide of uranium. J. appl. Phys., Lancaster, Pa., 38(8):3215-3222, July 1967.
26. MOSER, J.B. e KRUGER, O.L. Thermal conductivity and heat capacity of the monophosphide and monosulfide of plutonium. J. Am. Ceram. Soc., Easton, Pa., 51(7):369-372, 1968.
27. MURABAYASHI, M. ; NAMBA, S. ; TAKAHASHI, Y. e MUKAI-BO, T. Thermal conductivity of $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ system. - J. Nucl. Sci. Technol., Tokyo, 6(3):128-131, Mar. 1969.

28. MURFIN, D. *Developments in the flash method for the measurement of thermal diffusivity.* Rev. Int. Hautes Temp. Refract., Paris, 7:284-289, 1970.
29. NAMBA, S. ; KIM, P.H. ; ARAI, T. e KIKUCHI, T. *Measurement of thermal diffusivity by a laser pulse.* - Jap. J. appl. Phys., Tokyo, 6(8):1019, Aug. 1967.
30. NASU, S. e KIKUCHI, T. *Thermal diffusivity of UN - from 20 to 1000°C by a laser pulse method.* J. Nucl. Sci. Technol., Tokyo, 5(6):318-319, June 1968.
31. NIELSEN, K.L. Methods in Numerical Analysis. New York, The Mcmillan Co., 1956.
32. OLIVEROS, F.G. Programa HGAP en FORTRAN IV, para el calculo de la conductancia en el huelgo entre pastilla y vaina, en barras de combustible UO₂-circaloy. Madrid, Junta de Energia Nuclear, 1975. (JEN-309)
33. PARKER, W.J. ; JENKINS, R.J. ; BUTLER, C.P. e ABBOTT, G.L. *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity.* J. appl. Phys., Lancaster, Pa., 32(9):1679-1684, Sep. - 1961.
34. RAPIER, A.C. ; JONES, T.M. e McINTOSH, J.E. *The thermal conductance of uranium dioxide/stainless-steel - interfaces.* Int. J. Heat Mass Transfer, Oxford, 6 : 397-416, 1963.

35. ROBINSON, M.J. e TOMSIC, M. Thermal contact resistance by reflection of heat diffusion waves. Nucl. Technol., Hinsdale, Ill., 12:393-403, Dec. 1971.
36. ROSS, A.M. e STOUTE, R.L. Heat Transfer Coefficient - Between UO_2 e Zircaloy-2. Chalk River, Atomic Energy of Canada Limited, 1962. (AECL-1552)
37. RUDKIN, R.L. ; JENKINS, R.J. e PARKER, W.J. Thermal diffusivity measurements on metals at high temperatures. Rev. scient. Instrum., New York, 33(1):21-24 , Jan. 1962.
38. SCHAUER, D.A. e GIEDT, W.H. Contact conductance measurements during transient heating. Proc. Third Int. Heat Transfer Conf., Chicago, Ill., IV:100-108, Aug. 1966.
39. SHAW, D. ; GOLDSMITH, L.A. e LITTLE, A. Suitability of the flash method for measuring the thermal diffusivity of cracked specimens. Br. J. appl. Phys., - London, 2:597-604, 1969.
- 39a. SONNENSCHNEIN, G. e WINN, R.A. A relaxation time technique for measurement of thermal diffusivity. U.S. Air Force Rept. WADC - TR 59-273, 1-23, 1960. (AD 236660) apud TOULOUKIAN, Y.S. et alli. Thermal Diffusivity. New York, Plenum, 1973. (Thermophysical properties of matter, v.10). p.649.