

EDIVAL DE MORAIS

EMPREGO DE EXPERIMENTOS FATORIAIS
NA REDUÇÃO DE VARIÁVEIS PARA O
MODELAMENTO SEMI-EMPÍRICO DE
UMA TOCHA DE PLASMA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

CURITIBA
1992



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ATA DA DEFESA DE TESE DE MESTRADO DO SR. EDIVAL DE MORAIS

TÍTULO DA TESE: "Emprego de Experimentos Fatoriais na Redução de Variáveis para o Modelamento Semi-empírico de uma Tocha de Plasma"

Em sessão pública de defesa de tese, iniciada às quatorze horas, nesta data, após um seminário sobre o assunto da tese e arguição pela banca, esta decidiu atribuir Conceito A.

Curitiba, 24 de novembro de 1992.

Banca examinadora:

Dr. RENÉ ROBERT

Presidente/Orientador - UFPR

Dr. ARUY MAROTTA

UNICAMP

Dr. CARLOS MARIO GARCIA

LAC/COPEL - PR

AGRADECIMENTOS

Foram muitas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, agradeço:

Ao professor Renè Robert, pela orientação e apóio, que sempre estiveram ao meu dispor.

Aos professores Liu Kai e Rodolfo Eraldo Hulmann (Dpto de Física - UFPR), por terem iniciado, na UFPR, os estudos sobre tochas de plasma.

Aos professores Cesar Cusatis e Irineu Mazzaro, do Departamento de Física, pela permissão para o uso da oficina mecânica.

À professora Paula Vercelli (depto de Física-UFPR), pelo empréstimo de equipamentos e materiais.

Ao professor Carlos Cunha (Depto de Química - UFPR), pelo empréstimo de equipamentos e materiais.

Ao professor Aruy Marota (IFGW-UNICAMP), pelo apóio e incentivo.

Ao professor Daltro Garcia Pinatti (FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL, CENTRO DE MATERIAIS REFRACTÁRIOS, LORENA, S.P.), pelo fornecimento dos eletrodos de zircônio.

Aos estagiários (no Laboratório Central de Eletrônica e Eletrotécnica - LAC) Rafael G. Kravetz e Carlos Matias A. B.

Neto, pelo grande auxílio e envolvimento na realização dos experimentos. Também aos estagiários Emersom Dietrichkeit, José C. Vertuoso e Adilson L. Michelowski, pelo apóio suplementar.

Aos funcionários do LAC; Claudiné F. de Sousa, Guilherme F. Shimidt, João Salkovscki, Aldino Beal, Wandir Ney, J. Rodrigues, Davi Chaves e José Naufall Jr., pelo apóio na utilização da estrutura do laboratório.

Ao funcionário do LAC, Sérgio Hencke e o aluno do Depto de Química, Gerson L. Mantovani, pela realização das fotografias.

Aos Eng^{os} Paulo André e Adilson Vilar, pelo apóio técnico na área de informática.

Ao Químico Eduardo M. T. (doutorando no Laboratório de Química de Humus e Fertilizantes-Humusfértil, depto de Química, UFPR), pelo empréstimo do "software" *Design Ease*.

À secretária da Pós-graduação em Física, Joselanda S. Batista, pelo profissionalismo, dedicação e coleguismo com que conduziu seu trabalho nesses anos.

Ao meu irmão, Emersom L. de Moraes, pela ajuda na datilografia da dissertação.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apóio financeiro.

Ao superintendente do LAC (Laboratório Central de Eletrônica e Eletrotécnica), Eng^o Rogério R. Moro, pelo fornecimento da infraestrutura e equipamentos necessários ao trabalho experimental.

SUMÁRIO

	LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vii
	RESUMO.....	x
	ABSTRACT.....	xi
	INTRODUÇÃO.....	1
1	MODELAMENTO SEMI-EMPÍRICO DE TOCHAS DE PLASMA.....	4
1.1	DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS CONVENCIONAIS.....	6
1.2	DIFICULDADES OFERECIDAS PELOS PROCEDIMENTOS CONVENCIONAIS.....	13
1.3	USO DE EXPERIMENTOS FATORIAIS NO ESTUDO DE TOCHAS DE PLASMA.....	15
2	PROJETO DE EXPERIMENTOS EMPREGADO PARA AVALIAR OS EFEITOS DE MUDANÇAS NA GEOMETRIA DA TOCHA.....	18
2.1	ESCOLHA DAS RESPOSTAS E VARIÁVEIS.....	18
2.2	NÍVEIS DAS VARIÁVEIS E NÚMERO DE REPETIÇÕES PARA OS EXPERIMENTOS.....	26
3	RESULTADOS.....	29
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E CÁLCULO DE ERROS.....	34
4.1	PROJETO E CONSTRUÇÃO DA TOCHA DE PLASMA.....	34
4.2	EQUIPAMENTOS NOS CIRCUITOS ACOPLADOS À TOCHA.....	37
4.3	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS E CÁLCULO DE ERROS....	43
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53

6	CONCLUSÕES.....	87
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	APÊNDICE A: CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ELEMENTOS DOS CIRCUITOS ACOPLADOS À TOCHA.....	93
	APÊNDICE B: FOTOGRAFIAS DA TOCHA UTILIZADA NOS EX- PERIMENTOS.....	97
	APÊNDICE C: OSCILAÇÕES NA CORRENTE ELÉTRICA.....	105
	APÊNDICE D: CURVAS CARACTERÍSTICAS DA TOCHA DE DE PLASMA.....	111
	APÊNDICE E: DESCRIÇÃO DE ALGUNS ELEMENTOS DA ANÁLI- SE ESTATÍSTICA.....	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	-efeito da variável a
a	-diâmetro do anodo
B	-indução magnética; efeito de b
b	-diâmetro dos orifícios de injeção
C	-efeito de c ; calor específico
c	-velocidade da luz; espessura da câmara de vórtice.
D	-desgaste específico; efeito de d ; densidade de picos na corrente elétrica
d	-diâmetro da câmara de vórtice; densidade relativa de picos na corrente elétrica
E	-intensidade do campo elétrico
F	-frequência; vazão de água.
G	-vazão mássica de gás
H	-altura total média dos picos de corrente
h	-entalpia específica; altura
I	-corrente elétrica
j	-densidade de corrente
K	-coeficiente de absorção
L	-comprimento médio do arco
Lv	-amplitude das variações no comprimento do arco
l	-comprimento do anodo; dimensão linear característica
m	-massa; expoente real

n	-número de orifícios de injeção
P	-pressão
Q	-fluxo de calor
s	-velocidade do som
T	-temperatura
t	-tempo
U	-tensão elétrica; densidade de energia radiante
v	-velocidade
x	-coordenada de posição
Δw	-variação em w (w é qualquer parâmetro medido)
δw	-valor máximo do erro cometido na medida de w
α	-coeficiente adimensional
β	-expoente adimensional
ϵ	-permissividade
η	-viscosidade dinâmica
λ	-condutividade térmica
μ_0	-permeabilidade magnética do vácuo
ρ	-densidade
σ	-condutividade elétrica
τ	-tensão viscosa

Subscritos:

a	-valor de referência
a	-ânodo; arco; picos anômalos
ag	-água
c	-cátodo
e	-carga elétrica

f -fonte
i,j,k -direções coordenadas
P -pressão constante
t -tubulações
T -temperatura
 ν -frequência

Sobrescritos:

o -valor no equilíbrio

Abreviaturas:

eq. -equação
fig. -figura
cap. -capítulo
ap. -apêndice

RESUMO

Considera-se o problema da redução de variáveis no modelamento semi-empírico das tochas de plasma. Experimentos fatoriais são usados como uma alternativa à abordagem descrita na literatura, na qual os grupos adimensionais que compõem o modelo são selecionados por tentativas. Emprega-se experimentos fatoriais no estudo de uma tocha de plasma projetada para aquecer ar comprimido, com catodo quente e estabilizada por escoamento em vórtice do gás plasmagênico. São avaliados os efeitos de mudanças na geometria da câmara de descarga sobre a relação tensão x corrente, o fluxo de calor para os eletrodos, o desgaste do catodo, o comprimento médio do arco, as amplitudes das variações nesse comprimento e sobre a estabilidade da tocha. A análise dos resultados confirma os efeitos de mudanças no diâmetro do anodo sobre a relação tensão x corrente e sobre as perdas de calor para os eletrodos e indica a presença de outros.

ABSTRACT

The problem of variables reduction in the semi-empirical modelling of plasma torches is considered. Factorial experiments are used as an alternative to the approach described in the literature, in which the dimensionless groups that constitute the model are selected by attempts. Factorial experiments are employed to study a plasma torch, with hot cathode, stabilized by longitudinal eddy-flow of the plasma gas and designed to heat air. The effects of changes on the geometry of the discharge chamber are evaluated over the characteristic voltage \times current, the heat flux to the electrodes, the cathode wear, the mean arc length, the amplitude of the variations in this length and over the stability of the torch. The effects of changes on the anode diameter over characteristic voltage \times current and thermal losses at the electrodes are confirmed by this analysis. The presence of other effects are pointed out.

INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos, uma grande variedade de processos foram criados, nos quais se fez uso de gases aquecidos por arcos elétricos^[1,2,...,6]. Um importante problema no desenvolvimento de tais processos sempre foi o projeto e construção de um modelo adequado do dispositivo estabilizador do arco elétrico, chamado genéricamente de *gerador de plasma* ou *tocha de plasma*. Em 1973 ocorreram os primeiros esforços no sentido de estabelecer critérios e equações generalizadas para tais dispositivos e, nessas buscas de sistematização, as técnicas da análise dimensional e da teoria da similaridade foram empregadas^[7]. Antes disso, as tochas de plasma eram construídas de maneira artesanal. Apesar dos intensos estudos realizados ao longo de todos esses anos, ainda é necessária uma abordagem semi-empírica para o problema do desenvolvimento e caracterização do comportamento elétrico e térmico dos novos modelos de tochas. Isso se deve à grande complexidade do comportamento dos arcos elétricos, originada, por um lado, pelo grande número de variáveis intervenientes e fenômenos envolvidos e, por outro, pela evolução da importância relativa desses fenômenos de um modelo de tocha para outro.

Neste trabalho, é proposta uma abordagem alternativa

para o problema da caracterização do comportamento térmico e elétrico das tochas de plasma, que aparece no desenvolvimento de novos modelos desses dispositivos. Os procedimentos propostos têm a virtude de eliminar a técnica de tentativa - erro (guiada pela intuição do experimentador), empregada na escolha dos grupos adimensionais para a construção das fórmulas generalizadas, na abordagem tradicional^[7]. Por outro lado, os experimentos envolvidos na abordagem proposta têm o custo minimizado e, ainda, vários programas de computador, criados para analisar os seus resultados, estão disponíveis no mercado.

No capítulo 1, são apresentados os critérios utilizados na classificação dos vários tipos de tochas de plasma e as equações teóricas que descrevem os fenômenos eletromagnéticos e hidrodinâmicos envolvidos. É feita uma descrição de como o problema do modelamento das tochas de plasma foi abordado na ref.[7]. O emprego de experimentos fatoriais é proposto para contornar as dificuldades oferecidas por essa abordagem.

No capítulo 2, desenvolve-se um projeto de experimentos do tipo fatorial de dois níveis (2^n), destinado à avaliação dos efeitos da geometria da câmara de descarga no comportamento da tocha de plasma estudada.

No capítulo 3, os resultados dos experimentos conduzidos são apresentados.

No capítulo 4, a montagem experimental, os equipamentos e os procedimentos empregados na realização das medidas são descritos. Também são calculados os erros propagados.

No capítulo 5, a análise estatística dos resultados é apresentada, juntamente com os diagnósticos da análise dos resíduos sobre a validade das hipóteses relativas ao modelo estatístico subjacente.

No capítulo 6, apresenta-se as conclusões deste trabalho.

Estão relacionados também, no final desta dissertação, os estudos que devem ser conduzidos para dar continuidade a este trabalho.

CAPITULO 1

MODELAMENTO SEMI-EMPÍRICO DE TOCHAS DE PLASMA

Aos dispositivos geradores de gases com altas temperaturas pela convecção forçada desses gases através de um arco elétrico, dá-se o nome de *tochas de plasma* ou *geradores de plasma*. Visando as mais diversas aplicações, uma grande quantidade de modelos dessas tochas foi desenvolvida a partir de 1956^[1, ..., 6, 8] e, hoje, têm-se muitos desses dispositivos à disposição no mercado. Uma classificação das tochas de plasma é feita^[8] considerando-se de um lado, um parâmetro estrutural: a natureza dos eletrodos, e, de outro, dois parâmetros de funcionamento: o modo de estabilização da coluna do arco e a natureza do fluido plasmagênico utilizado. Por estes critérios, uma tocha de plasma pode, então, classificar-se em:

- a) quanto aos eletrodos: com catodos quentes ou frios.
- b) quanto à estabilização: por parede, por escoamento em vórtice do fluido plasmagênico, por campo magnético.
- c) quanto à natureza do fluido plasmagênico: gas oxidante, gas não oxidante e líquido.

A figura (1.1) é uma representação esquemática da tocha utilizada neste trabalho: é do tipo com catodo quente (tungstênio com 2% de tório) e estabilizada por escoamento em vórtice do gás plasmagênico. Destina-se ao aquecimento de gases e, nos experimentos, foi operada com ar comprimido. No capítulo 4, serão mostrados os detalhes de construção e os parâmetros de funcionamento. O gás plasmagênico (ar) é

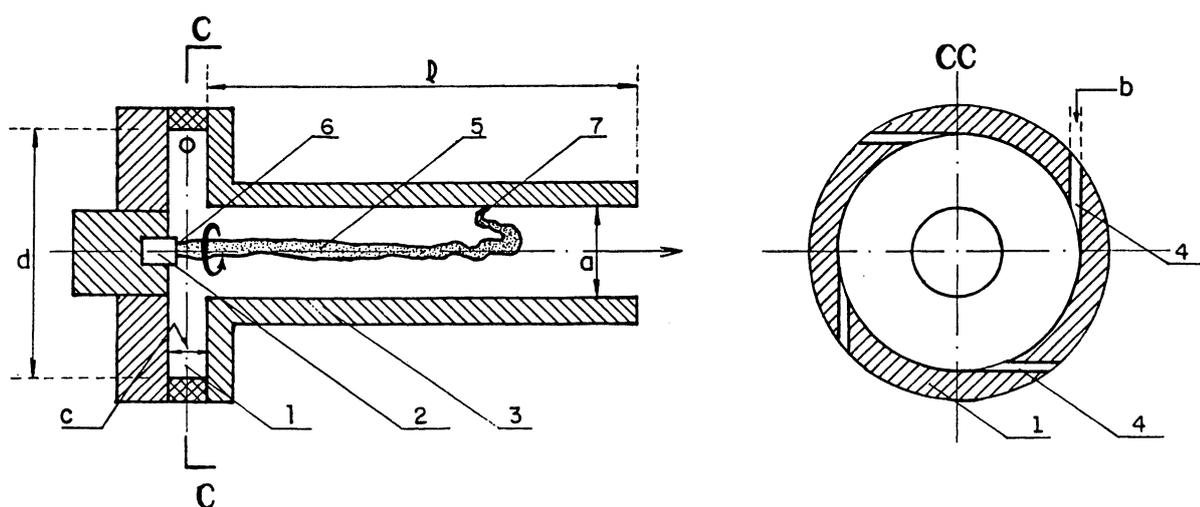


Fig. 1.1-Tocha de plasma estabilizada por escoamento em vórtice de ar. 1)câmara de vórtice, 2)catodo, 3)anodo, 4)orifícios de injeção do gás plasmagênico, 5)arco, 6)pé do arco no catodo, 7)pé do arco no anodo.

injetado tangencialmente pelos orifícios da câmara de vórtice e escoam ao longo do anodo tubular. A forma helicoidal do campo de velocidades assim obtido força a localização axialmente centralizada do arco, indicada na fig.1.1, e faz com que o pé do arco gire rapidamente e oscile na direção axial sobre a superfície do anodo. Através do efeito joule, uma grande

quantidade de calor é transferida do arco para o gás plasmagênico, que se expande violentamente em direção à extremidade aberta do anodo. Externamente, o que se observa é um jato de ar quente, ruidoso e brilhante, com o aspecto de uma tocha (ver figs. 4.2 e B-1).

A seguir será descrito como a Análise Dimensional e a teoria de similaridade são empregadas, na literatura, para correlacionar as características dos arcos elétricos nas tochas de plasma. Simultaneamente, os resultados da ref.[7] relevantes para este trabalho serão apresentados. Na secção (1.2) serão discutidas as dificuldades oferecidas pelos procedimentos empregados na ref.[7] para obter correlações generalizadas para alguns tipos de tochas e, finalizando o capítulo, na secção (1.3) será apresentada a conveniência do uso de experimentos fatoriais do tipo 2^n para contornar essas dificuldades e, possivelmente, melhorar os resultados da ref.[7].

1.1 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS CONVENCIONAIS.

O comportamento de um arco elétrico sob convecção forçada é descrito pelo sistema de equações diferenciais (1-18) abaixo^[7], que envolve os processos que estão simultaneamente interagindo no arco (efeitos elétricos, magnéticos, fluido-dinâmicos e térmicos):

Balanços de momentum, massa e energia:

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla \cdot \vec{P} + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (01)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (02)$$

$$\rho \vec{v} \cdot \nabla (h + v^2/2) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q = \vec{j} \cdot \vec{E} \quad (03)$$

Equações de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (04)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (05)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (06)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho_e / \epsilon \quad (07)$$

Lei de ohm:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (08)$$

Equações para o transporte de energia radiante:

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{3} K_\nu \nabla (c U_\nu) \right] + c (U_\nu^0 - U_\nu) K_\nu = 0 \quad (09)$$

$$Q - c \sum_\nu K_\nu (U_\nu^0 - U_\nu) = 0 \quad (10)$$

Equações constitutivas:

$$\rho = \rho(T, P) \quad (11)$$

$$h = h(T, P) \quad (12)$$

$$\sigma = \sigma(T, P) \quad (13)$$

$$\eta = \eta(T, P) \quad (14)$$

$$\lambda = \lambda(T, P) \quad (15)$$

$$U_{\nu}^0 = U_{\nu}^0(T, P) \quad (16)$$

$$K_{\nu} = K_{\nu}(T, P) \quad (17)$$

Componentes do tensor *tensão viscosa*:

$$\tau_{ij} = \eta \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (18)$$

Estas equações valem^[7] para um arco queimando no ar com $I < 1000A$, $v < 5$, $l \approx 5mm$, $P \approx 10^5 N/m^2$ e $B < 1.0T$.

Não é possível resolver estas equações para prever as características de um arco elétrico real. Elas são empregadas na derivação, através da *Análise Dimensional*^[9,10,11], dos grupos adimensionais, π , utilizados na construção das curvas generalizadas que correlacionam as características do arco. Na ref.[7], equações generalizadas para alguns tipos de tochas de plasma foram obtidas nas etapas seguintes:

- a) derivou-se as equações (1-18) com as restrições descritas acima.
- b) as equações (1-18) foram reduzidas nas suas formas adimensionais e, desse modo, obteve-se os vários grupos adimensionais característicos das descargas estudadas.
- c) entre os diversos grupos, π , obtidos, buscou-se, empiricamente, aqueles que refletiam os processos mais importantes em cada descarga. Nessa busca, as equações generalizadas para os diferentes modelos de tocha foram simultaneamente obtidas

Na tab.(1.1), são mostrados os grupos adimensionais, π , derivados na ref.[7] para 6 diferentes tipos de descargas. Eles foram obtidos (conforme a etapa (b), acima) a partir das eqs.(1-10 e 18). Os procedimentos empregados foram: 1) cada variável e operador de (1-10 e 18) foi expresso, dimensionalmente, em termos dos seguintes conjuntos de *parâmetros primários*, que determinavam as características das 6 descargas estudadas:

- a) $I, l, P_o, B_o, v_o, (j_o = I/l^2)$
- b) $I, l, P_o, B_o, G, (j_o = I/l^2, v_o = G/\rho_o l^2)$
- c) $I, l, P_o, v_o, (j_o = I/l^2, B_o = \mu_o I/l)$
- d) $I, l, P_o, G, (j_o = I/l^2, v_o = G/\rho_o l^2, B_o = \mu_o I/l^2)$
- e) $I, l, P_o, B_o, (j_o = I/l^2, v_o^2 = B_o I/\rho_o l)$
- f) $I, l, P_o, (j_o = I/l^2, v_o^2 = \mu_o I^2/\rho_o l^2, B_o = \mu_o I/l)$

onde cada símbolo representava um valor característico da variável correspondente, especificada na *Lista de Símbolos e Abreviaturas* (pag. vii). O índice zero identificava os *parâmetros de referência*, que controlavam as descargas. 2) as eqs. (1-10 e 18), expressas em termos dos parâmetros primários acima, foram reduzidas nas suas formas adimensionais dividindo-se cada equação por uma de suas parcelas, como está indicado na tab.1.1.

Parâmetros primários	TERMOS DAS EQUAÇÕES E GRUPOS ADIMENSIONAIS				
	$\rho(\vec{v} \cdot \vec{v})\vec{v}$	$= -\vec{\nabla} \cdot p$	$+\vec{\nabla} \cdot \zeta$	$+\vec{J} \times \vec{B}$	
	1.1	1.2	1.3	1.4	
a	1	$P_0/\rho_0 V_0^2$	$\eta_0/\rho_0 V_0 L$	$B_0 I/\rho_0 V_0^2 L$	--
b	1	$\rho_0 P_0 L^4/G^2$	$\eta_0 L/G$	$\rho_0 B_0 I L^3/G^2$	--
c	1	$P_0/\rho_0 V_0^2$	$\eta_0/\rho_0 V_0 L$	$\mu_0 I^2/\rho_0 V_0^2 L^2$	--
d	1	$\rho_0 P_0 L^4/G^2$	$\eta_0 L/G$	$\rho_0 \mu_0 I^2 L^2/G^2$	--
e	1	$P_0 L/B_0 I$	$(\eta_0^2/\rho_0 B_0 I L)^{0,5}$	1	--
f	1	$P_0 L^2/\mu_0 I^2$	$(\eta_0^2/\rho_0 \mu_0 I^2)^{0,5}$	1	--
	$\rho \vec{v} \cdot \vec{v} h$	$+\rho \vec{v} \cdot \vec{v} \frac{1}{2}$	$-\vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla} T)$	$+ Q$	$= \vec{J} \cdot \vec{E}$
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
a	$\rho_0 \sigma_0 h_0 V_0 L^3/I^2$	$\sigma_0 \rho_0 V_0^3 L^3/I^2$	$\sigma_0 \lambda_0 I_0 L^2/I^2$	$\sigma_0 Q_0 L^4/I^2$	1
b	$\sigma_0 h_0 G L/I^2$	$\sigma_0 G^3/\rho_0^2 I^2 L^3$			1
c	$\rho_0 \sigma_0 h_0 V_0 L^3/I^2$	$\sigma_0 \rho_0 V_0^3 L^3/I^2$			1
d	$\sigma_0 h_0 G L/I^2$	$\sigma_0 G^3/\rho_0^2 I^2 L^3$			1
e	$(\sigma_0^2 \rho_0^2 B_0 L^5/I^5)^{0,5}$	$(\sigma_0^2 B_0^3 L^3/\rho_0 I)^{0,5}$			1
f	$(\sigma_0^2 \rho_0^2 \mu_0 L^4/I^4)^{0,5}$	$(\sigma_0^2 \mu_0^3 I^2/\rho_0)^{0,5}$			1
eq. 4:	$\pi_4 = \mu_0 I/BL$	eq. 7:	$\pi_7 = EI/\sigma_0 \rho_0 L^3$	eq. 8:	$\pi_8 = UL \sigma_0/I$
eq. 9:	$\pi_9 = K_V L$	eq. 10:	$\pi_{10} = Q/c k_0 U_0$		

Tab. 1.1- Grupos adimensionais derivados na ref. [7] a partir das eqs. (1,3, 4,7,8,9,10 e 18) da secção (1.1).

Não se obteve grupos adimensionais a partir das equações (11-17). Em vez disso, elas foram aproximadas por leis de potência da forma seguinte:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n_\rho} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{m_\rho} \\ \frac{h}{h_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{n_h} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{m_h} \\ \vdots \\ \text{etc} \end{array} \right.$$

Onde os valores de referência σ_o , h_o , ..., etc. foram definidos em termos de ajustes empíricos para a relação entre a condutividade, σ , e a entalpia, h , de cada gás plasmagênico utilizado.

As equações generalizadas para as diferentes tochas estudadas na ref.[7] foram obtidas testando-se a habilidade dos parâmetros, π , conduzirem ou não os pontos experimentais sobre uma única curva generalizada do tipo (19). Um parâmetro só foi mantido na equação se reduziu o espalhamento dos pontos experimentais. Dos resultados apresentados na ref.[7], os mais importantes foram aqueles relativos às características UxI e QxI de descargas estabilizadas por escoamento longitudinal em vórtice de gases. Mostrou-se que a relação (19) seguinte, com α e β determinados empiricamente, descrevia bem a característica UxI dessas descargas, enquanto o diâmetro dos eletrodos não era demasiadamente modificado.

$$\frac{Ua\sigma_o}{I} = \alpha \left[\frac{I^2}{Ga\sigma_o h_o} \right]^\beta \quad (19)$$

Resultados experimentais foram apresentados para diversos modelos de tochas, operados com tipos diferentes de gases plasmagênicos a vazões distintas. Os dois parâmetros presentes em (19) ajustavam razoavelmente bem os pontos experimentais enquanto não se alterava significativamente o diâmetro, a , dos eletrodos (na ref.[7] estudou-se tochas com catodos tubulares). Só se conseguiu incluir essas mudanças na geometria das tochas através de equações nas quais o número de

parâmetros, π , igualava o número de variáveis independentes, o que não representava nenhuma generalização.

Para as perdas de calor nos eletrodos, os grupos adimensionais utilizados na ref.[7] nas correlações generalizadas $Q \times I$ para o anodo e para o catodo foram os seguintes:

$$\frac{Q}{\sigma_o \mu_o \rho_o h_o^2 a^3} = \alpha \left(\frac{I^2 l}{\sigma_o^2 \mu_o \rho_o h_o^2 a^5} \right)^\beta \quad (20)$$

Onde α e β foram determinados empiricamente. Nas tentativas efetuadas para ajustar equações envolvendo dois grupos adimensionais, apenas aqueles presentes em (20) reduziram significativamente o espalhamento dos pontos experimentais. O melhor ajuste apresentou uma variância de 23%. Revelou-se a desconfiança de que os parâmetros mais importantes para os processos de transferência de calor para os eletrodos permaneciam perdidos.

1.2 DIFICULDADES OFERECIDAS PELOS PROCEDIMENTOS CONVENCIONAIS

Qualquer tipo de análise parcial (Análise dimensional, Teoria de Similaridade e Método de Síntese) tem etapas bem definidas e a aplicação dessas técnicas à resolução de um dado problema segue, geralmente, a seguinte rotina ^[9,10,11]:

- a) escolha dos parâmetros relevantes para descrever o comportamento do sistema.

- b) obtenção dos grupos adimensionais, π .
- c) utilização dos grupos π na determinação, empírica, de relações generalizadas para o sistema ou na construção de modelos reduzidos.

As decisões tomadas na primeira das três etapas acima determinarão o nível de complexidade ou, até mesmo, o sucesso das etapas seguintes. Se alguma variável importante não for incluída, os grupos adimensionais obtidos não descreverão todo o problema, tornando pobre a correlação entre os grupos, π , e inadequado o modelamento do sistema a partir desses grupos. Se, para garantir a descrição completa do problema, um número excessivamente grande de variáveis for incluído, a análise experimental (para descobrir entre os vários grupos adimensionais obtidos, aqueles que são relevantes para o comportamento do sistema) se tornará inviável ou trabalhosa e cara na melhor das hipóteses.

Assim, devido ao papel decisivo que a etapa (a) acima tem sobre o desenvolvimento das etapas posteriores, parece imperativa a necessidade de uma técnica para descobrir, já no início da análise, quais são as variáveis mais importantes para o comportamento do sistema. Feito isso, restarão apenas duas tarefas: determinar as formas mais convenientes para os grupos adimensionais e ajustar, empiricamente, os coeficientes das equações generalizadas envolvendo esses grupos.

Como foi visto na secção (1.1), na ref.[7] procurou-se obter equações generalizadas para alguns modelos de tochas.

Relativamente aos procedimentos empregados, foi visto que a obtenção dos grupos π da tabela (1.1) exclusivamente a partir das equações (1-18), conduziu a um número muito grande desses parâmetros e à necessidade de se descobrir, entre eles, aqueles que eram realmente importantes na caracterização de cada modelo de tocha. A grande variedade de grupos π e de composições possíveis não permitiu a obtenção de relações generalizadas satisfatórias. Esta dificuldade poderia ser contornada pela introdução de um método sistemático para descobrir, entre as variáveis presentes nas equações (1-18) e nos grupos da tab.1.1, aquelas que são mais importantes para cada modelo de tocha. Visando esse objetivo, a técnica de projeto e análise de experimentos do tipo fatorial de dois níveis^[12,13] será apresentada na próxima secção.

1.3 USO DE EXPERIMENTOS FATORIAIS NO ESTUDO DE TOCHAS DE PLASMA.

Um projeto de experimento do tipo fatorial 2^n é destinado a levantar, entre vários parâmetros considerados, aqueles que exercem algum efeito sobre uma dada resposta do sistema em estudo^[12,13]. Cada variável é tomada em dois níveis e experimentos são conduzidos para se obter respostas do sistema, quando ele é submetido a todas as configurações de níveis possíveis para todas as variáveis (daí o adjetivo *fatorial*). As *interações* entre as variáveis consideradas, que

afetam as respostas estudadas, também são determinadas. As conclusões da análise são respaldadas por princípios e modelos estatísticos. Esse tipo de abordagem é simples, acurado e o de menor custo possível^[12,13].

O problema de obtenção das equações generalizadas para um certo modelo de tocha de plasma poderia, então, ser abordado nas etapas seguintes:

- a) construção de um protótipo com o desempenho necessário para os estudos;
- b) análise dimensional das eqs.(1-18) e obtenção dos grupos π em termos dos *parâmetros primários* adequados para o modelo de tocha em estudo.
- c) entre as variáveis presentes nas equações (1-18) e nos grupos π obtidos em (b), levantamento das que exercem maior influência sobre as respostas de interesse (relações U_t , Q_a e Q_c , por exemplo). Isso seria feito através da execução de um projeto de experimento do tipo fatorial 2^n ;
- d) seleção dos parâmetros adimensionais adequados ao tipo de tocha em estudo a partir dos resultados do item (c) e dos grupos, π , gerados pela *Análise Dimensional* das equações (1-18);
- e) determinação, empírica, dos coeficientes e expoentes das equações generalizadas contendo os grupos selecionados no item (d) e verificação final da suficiência dos parâmetros incluídos.

A parte experimental deste trabalho concentrou-se nas etapas (a) e (c) descritas acima. Os resultados relativos ao desenvolvimento do protótipo estão descritos no capítulo 4. Basicamente, consistiram na implementação de eletrodos facilmente substituíveis para uma tocha de 30kw, do tipo mostrado na fig.1.1, destinada ao aquecimento de ar comprimido e que estava disponível nos laboratórios do departamento de Física da UFPR. Não foi necessário executar a etapa (c) completamente, pois estavam disponíveis os resultados de [7] para arcos estabilizados por escoamento em vórtice de gases, descritos na secção (1.1). Assim, não foi necessário investigar todos os parâmetros presentes nas equações (1-18), já que as relações (19) e (20) indicavam que as equações generalizadas que descreveriam as características elétricas e térmicas da tocha da fig.1.1 deveriam conter, pelo menos, as variáveis listadas nas relações funcionais seguintes:

$$U = u(I, G, a, \sigma_o, h_o) \quad (21)$$

$$Q = q(I, l, a, \sigma_o, h_o, \rho_o, \mu_o) \quad (22)$$

onde os parâmetros presentes em (21) são os mesmos da equação (19) e os em (22) são aqueles que aparecem em (20).

As considerações apresentadas em [7] e alguns resultados das ref.[14] e [15] levaram a buscar entre os parâmetros geométricos da tocha da fig.1.1, aqueles que poderiam melhorar as equações (19) e (20) no sentido de ajustarem melhor os pontos experimentais sobre uma única curva

generalizada. Nos capítulos que seguem, tal busca será descrita. Ela foi realizada através do desenvolvimento, execução e análise de um projeto de experimento do tipo fatorial 2^n .

CAPÍTULO 2

PROJETO DE EXPERIMENTOS EMPREGADO PARA AVALIAR OS EFEITOS DE MUDANÇAS NA GEOMETRIA DA TOCHA

A seguir, são justificadas as decisões tomadas durante a elaboração do projeto de experimentos empregado nesta dissertação para o estudo da tocha de plasma para aquecimento, representada esquematicamente na fig.1.1. A exposição segue as recomendações da literatura^[12,19] relativas à sequência para o desenvolvimento de um projeto de experimentos: na secção (2.1) são apresentados os critérios e decisões relativos à *escolha das respostas e variáveis* consideradas no projeto. Simultaneamente, são apresentadas também as definições para essas respostas. Na secção (2.2) é descrito o processo decisório relativo à *escolha dos níveis (valores) das variáveis e do número de repetições para cada experimento.*

2.1 ESCOLHA DAS RESPOSTAS E VARIÁVEIS

Durante todas as etapas da realização deste trabalho, teve-se ciência de que experimentos envolvendo mudanças na

geometria da tocha seriam trabalhosos e, por isso, foi constante a preocupação em se tirar deles a maior quantidade de informações possível. Assim, esforço foi dispendido no sentido de incluir nos ensaios, além das medidas de queda de tensão na tocha, U_t , e da taxa de calor perdida para os eletrodos, Q_a e Q_c , o maior número possível de parâmetros considerados importantes na caracterização da tocha e *passíveis de serem afetados por alterações na geometria da câmara de descarga*. Com os equipamentos que estiveram disponíveis, foi possível determinar, para corrente elétrica e vazão de ar fixas e para cada geometria, as respostas presentes na lista (23) abaixo:

U_t	= queda de tensão na tocha	}	(23)
Q_a	= taxa de calor perdido no ânodo		
Q_c	= taxa de calor perdido no catodo		
D_c	= desgaste específico de catodo		
L	= comprimento médio do arco		
L_v	= variação no comprimento do arco		
H	= altura total média dos picos de corrente		
D	= densidade dos picos de corrente		
h_a	= altura total média relativa dos picos anômalos		
d_a	= densidade relativa dos picos anômalos		

A variação no comprimento do arco, L_v , expressa o valor da amplitude das oscilações axiais do pé do arco sobre a superfície do anodo (fig.1.1). Em conjunto, os quatro últimos parâmetros (H , D , h_a e d_a) caracterizam a estabilidade da tocha e se referem à fig.2.2. Os outros parâmetros de (23), além de U_t , Q_a , Q_c e D_c , serão definidos nos próximos parágrafos, durante a exposição dos motivos que levaram ao estudo de cada um deles.

O levantamento dos parâmetros geométricos relevantes para U_t , Q_a e Q_c foi escolhido, no capítulo 1, para ser a tarefa central deste trabalho. Quanto à taxa de desgaste do catodo, D_c , a princípio não era aparente que alterações na geometria da tocha pudesse afetá-lo. Todavia, alguns resultados apresentados na bibliografia consultada^[14,15] indicaram que tal efeito poderia ocorrer. Isso levou à inclusão de D_c em (23).

Os parâmetros L e L_v são definidos em termos das figs.1.1 e 2.1. O comprimento médio, L , do arco é a distância entre a superfície do catodo e o ponto médio da marca deixada pelo pé do arco sobre a superfície do anodo (fig.2.1). A extensão máxima dessa marca define L_v , a amplitude dos movimentos axiais do pé do arco sobre a superfície do anodo (fig.1.1). Decidiu-se medir estes parâmetros porque o conhecimento das variáveis influentes sobre L e L_v pode, eventualmente, levar a uma expressão que possibilite a minimização das perdas de calor e forneça o comprimento mínimo

necessário para o anodo, de modo que o pé do arco não salte para fora do bocal da tocha.

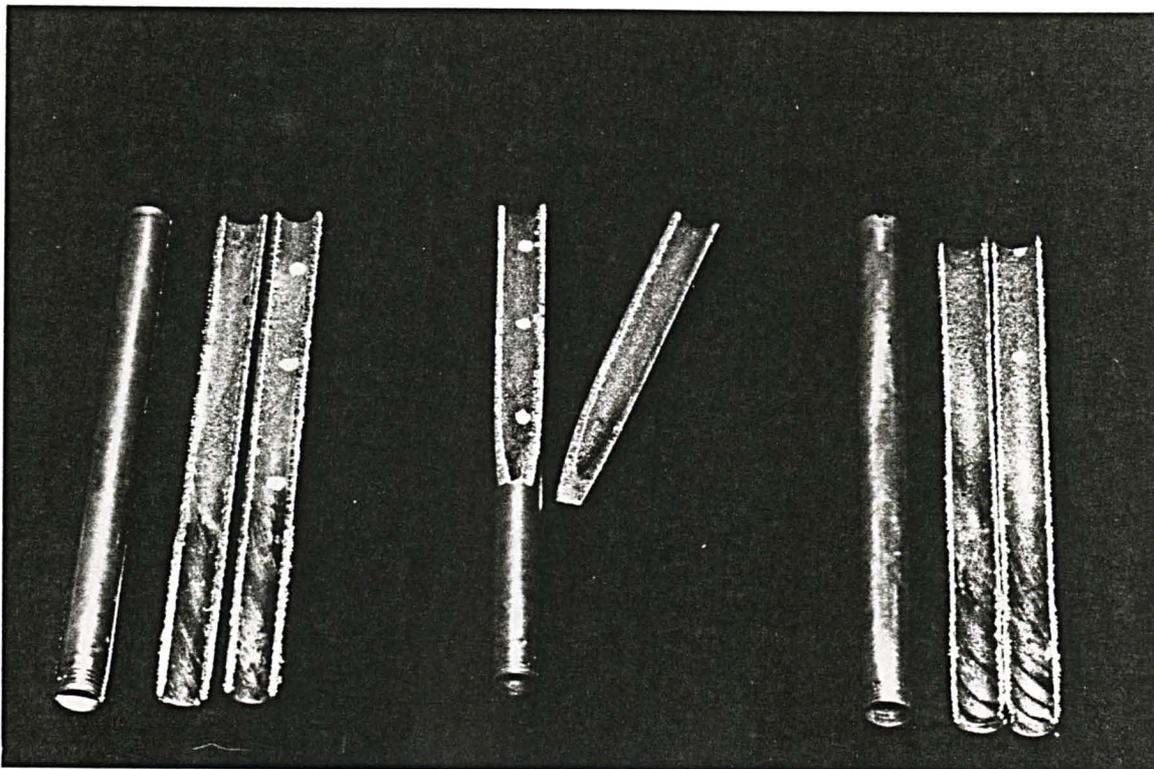


fig.2.1- superfícies internas de anodos da tocha da fig.1.1. Os três pontos localizam o centro e as bordas da marca deixada pelo pé do arco.

A terminologia empregada nas definições dos parâmetros de estabilidade (H , D , h_a e d_a) foi emprestada do estudo das superfícies técnicas^[16], onde são encontrados diagramas (relativos à textura de superfícies) muito parecidos com o da fig.2.2, seguinte:

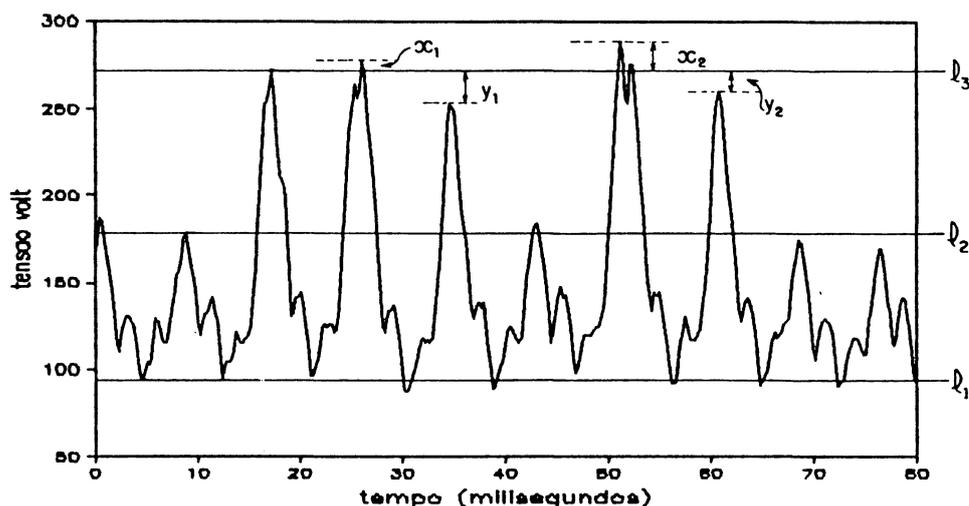


fig.2.2- Oscilações na tensão sobre uma carga resistiva, $R (= 1.08 \Omega)$, ligada em série com a tocha, quando lia-se, no painel da fonte, $I_f = 130A$ (corrida 16, leitura 2). A presença dos picos anômalos (os mais altos) indica a ocorrência de instabilidades elétricas e térmicas.

Os valores de H e D se referem, respectivamente, à altura média e à densidade dos picos normais (mais baixos) de corrente. Os de h_a e d_a se referem à altura média relativa e à densidade relativa dos picos anômalos, em relação aos picos normais. Com o auxílio da fig.2.2, ficam estabelecidas, então, as definições seguintes:

$$\left. \begin{aligned}
 H &= \frac{1}{R} (\text{teto médio} - \text{base média dos picos}) = \frac{1}{R} (T_P - B_P) \\
 D &= \frac{\text{número de picos}}{\text{intervalo de tempo correspondente}} = \frac{N_P}{t} \\
 h_a &= \frac{\text{altura média dos picos anômalos}}{\text{altura média dos picos}} = \frac{h}{T_P} \\
 d_a &= \frac{\text{número de picos anômalos}}{\text{número de picos normais}} = \frac{N_a}{N_P}
 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

onde o valor de R pode ser extraído da fig.B-1 (ap.B), em

função da corrente elétrica "média", lida no painel da fonte de alimentação. A base média dos picos, o teto médio dos picos normais e o teto médio dos picos anômalos têm seus valores definidos, respectivamente, pela posição das linhas médias l_1 , l_2 e l_3 , na fig.2.2. Tais linhas são locadas de tal modo que se tem, em cada caso, picos (ou vales) acima e abaixo delas. As somas das distâncias das extremidades dos picos (ou vales) à linha média devem ser iguais para os picos (ou vales) acima e abaixo dessa linha. Para a linha l_3 , da fig.2.2, deve-se ter, por exemplo:

$$x_1 + x_2 = y_1 + y_2$$

Em conjunto, os parâmetros de (24) caracterizam o nível de estabilidade da tocha no momento em que o diagrama da fig.2.2 foi obtido.

Os parâmetros H , D , h_a e d_a foram incluídos em (23) exatamente por caracterizarem, em conjunto, a estabilidade do arco, que era um item muito importante para o desempenho da tocha: sob funcionamento instável, a tocha perdia mais calor para os seus eletrodos, que se desgastavam mais rapidamente e, além disso, ela podia "apagar" a qualquer momento. Os valores de H , D , h_a e d_a foram obtidos a partir de registros de osciloscópio como o da fig.2.2, que mostra as oscilações na tensão sobre um resistor, R , ligado em série com a tocha. Nos cálculos de H , D , h_a e d_a , o valor de R foi obtido a partir da fig.B-1, do apêndice B, que dá o valor da carga, R , em função

da corrente "média", I_f , lida no painel da fonte de alimentação.

Será considerada, agora, a escolha das variáveis geométricas que foram estudadas neste trabalho. Na representação esquemática da fig.1.1, vê-se que a geometria da tocha era relativamente simples. Apenas os seis parâmetros da lista (25) abaixo eram suficientes para definir a geometria da câmara de descarga:

a=diâmetro do anodo

b=diâmetro dos orifícios de injeção

c=espessura da câmara de vórtice

d=diâmetro da câmara de vórtice

l=comprimento do anodo

n=número de orifícios de injeção

(25)

Considerou-se três critérios para escolher, entre estas variáveis, aquelas cujos efeitos foram avaliados sobre os parâmetros de (23): 1) a viabilidade da realização dos experimentos, 2) a influência dessas variáveis sobre o campo de escoamento do fluido plasmagênico e 3) a quantidade de resultados encontrados na literatura, relativos a essas variáveis^[7].

Algumas características do projeto de experimentos foram estabelecidas através das eqs.(1-18), que indicavam um forte acoplamento entre as características do arco e o campo

de escoamento na câmara de descarga. Como esse campo era determinado pelas fronteiras da câmara de descarga, era viável a ocorrência de interações de ordens elevadas entre os parâmetros de (25) sobre as respostas da lista (23). Desse modo, um projeto *fracional*^[12,19] de experimentos não podia ser empregado: escolheu-se um projeto *completo* e com uma repetição para cálculo da variância errática.

Um projeto de experimentos fatorial 2^n , com duas repetições, envolvendo os seis parâmetros de (25) teriam:

$$2 \times 2^6 = 128 \text{ corridas}$$

A não disponibilidade de recursos para a confecção das peças na quantidade necessária levou à eliminação de pelo menos duas das seis variáveis em (25). Isso reduziu o número de corridas para 32:

$$2 \times 2^4 = 32 \text{ corridas}$$

Notou-se que, entre as variáveis de (25), o diâmetro dos orifícios de injeção (b) e o número desses orifícios (n) afetavam de modo semelhante o campo de escoamento do gás plasmagênico: ambos definiam, para uma dada vazão do gás, a velocidade de injeção (tangencial) na câmara de vórtice. Desse modo, não foi necessário manter b e n, simultaneamente, como variáveis na lista (25). Por questão de praticidade na construção das peças, manteve-se o diâmetro, b, em (25) e,

para o número de orifícios, fixou-se um valor ($n=4$) para todos os ensaios. O outro parâmetro escolhido para permanecer constante foi o comprimento, l , do anodo.

Para a análise, tomou-se, como variáveis, os parâmetros relativos à câmara de vórtice, sobre a qual foram encontrados poucos resultados na literatura consultada, e o diâmetro, a , do anodo, cuja importância para as relações $U_t \times I$ e $Q \times I$ já estava estabelecida nas equações (20) e (21). O diâmetro do anodo foi mantido na análise para testar a eficácia dos experimentos, planejados para levantar variáveis relevantes para o desempenho da tocha.

A escolha dos valores fixos para n e l também foi criteriosa: para n , tomou-se o valor mais frequentemente citado na literatura consultada ($n=4$). Para l (150mm), um valor tal que, para uma geometria arbitrariamente escolhida, o engate do pé do arco sobre o anodo (fig.1.1) ocorresse razoavelmente distante do bocal da tocha (fig.2.1).

2.2 NIVEIS DAS VARIÁVEIS E NÚMERO DE REPETIÇÕES PARA OS EXPERIMENTOS

Estabelecidas as variáveis e respostas que seriam analisadas nos experimentos, faltava fixar os valores em que cada uma dessas variáveis seriam tomadas e o número de repetições para cada experimento.

Uma vez que cada variável devia ser considerada em apenas dois níveis e os modelos estatísticos utilizados na análise das respostas eram lineares^[12,13], os valores dos pares de níveis escolhidos para a, b, c e d não podiam ser muito diferentes. Para garantir a linearidade das respostas, foram escolhidos os seguintes pares de valores:

$$\begin{array}{ll}
 a_{-} = 9,6\text{mm} & a_{+} = 11,2\text{mm} \\
 b_{-} = 3,8\text{mm} & b_{+} = 4,2\text{mm} \\
 c_{-} = 5,5\text{mm} & c_{+} = 6,5\text{mm} \\
 d_{-} = 30,0\text{mm} & d_{+} = 33,0\text{mm}
 \end{array} \tag{26}$$

onde os índices "+" e "-" indicam os níveis "alto" e "baixo", respectivamente, de cada variável.

Os parâmetros da geometria da câmara de descarga utilizada como referência na escolha dos níveis de (26) foram:

$$\begin{array}{ll}
 a = 10,0\text{mm} & \text{(diâmetro do anodo);} \\
 b = 4,0\text{mm} & \text{(diâmetro dos orifícios de injeção);} \\
 c = 6,0\text{mm} & \text{(espessura da câmara de vórtice);} \\
 d = 30,0\text{mm} & \text{(diâmetro da câmara de vórtice).}
 \end{array}$$

Estes valores foram calculados a partir de fórmulas empíricas generalizadas e critérios fornecidos na ref.[17].

Quanto ao número de repetições para cada experimento, ele deveria ter sido determinado através das *Curvas Operacionais Características* para o *Modelo de Efeitos Fixos*

empregado na análise da variância^[13]. Mas isso não foi possível, uma vez que não havia dados disponíveis, mesmo que grosseiros, sobre a variabilidade errática dos parâmetros em (23). Desse modo, foram programadas duas repetições para os experimentos, que é o número mínimo necessário para o cálculo da variância errática.

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados dos 32 ensaios avaliando as respostas da lista (23), correspondentes a todas as combinações dos níveis definidos em (26) para as variáveis a, b, c e d.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

Nas tabs.3.1-a e 3.1-b (págs.32 e 33), são mostrados os resultados dos experimentos conduzidos para cumprir o objetivo deste trabalho: levantar variáveis geométricas que possam melhorar as equações generalizadas (19 e 20) que correlacionam as características da tocha estudada (fig.1.1). Todas as variáveis e respostas escolhidas na secção 2.1 para serem analisadas estão presentes nas referidas tabelas. Cada resultado numérico corresponde ao valor de uma das respostas da lista (23), medido numa das duas duplicatas dos 16 experimentos planejados no capítulo 2.

As tabelas 3.1-a e 3.1-b foram geradas pelo mesmo "software" utilizado para fazer os cálculos da análise dos resultados (cap.5). Cada linha se refere a uma das duplicatas dos 16 experimentos necessários para combinar os dois níveis de cada uma das quatro variáveis estudadas:

a=diâmetro do anodo

b=diâmetro dos orifícios de injeção

c=espessura da câmara de vórtice

d=diâmetro da câmara de vórtice

Nas colunas 3, 4, 5 e 6, são mostradas as configurações de níveis em que estas variáveis foram consideradas. Elas definem as várias geometrias consideradas para a tocha. Nas colunas correspondentes a R_1 , R_2 , ..., etc., são mostrados os valores medidos para as 9 respostas de interesse:

U_t = queda de tensão na tocha

Q_a = taxa de calor perdido no ânodo

Q_c = taxa de calor perdido no catodo

D_c = desgaste específico de catodo

L = comprimento médio do arco

L_v = variação no comprimento do arco

H = altura total média dos picos de corrente

D = densidade dos picos de corrente

h_a = altura total média relativa dos picos anômalos

d_a = densidade relativa dos picos anômalos

Na primeira coluna é mostrada a ordem (randomizada) em que os 32 ensaios foram realizados. A "ordem standard", mostrada na última coluna da direita, se refere a um arranjo sequencial para os experimentos que aparece ao se combinar, seguindo uma sistemática específica^[12,13], os níveis escolhidos para as variáveis. Existem projetos de experimentos em que a ordem de corrida dos ensaios é randomizada em blocos. Estes blocos são indicados na segunda coluna (BLK).

Os quatro algarismos após a vírgula, nos valores das tabelas 3.1-a e 3.1-b, foram introduzidos pelo "software"

utilizado nos cálculos. Através dos cálculos de propagação de erros (capítulo 4), serão obtidos os intervalos de confiança para as respostas determinadas:

$$\delta U_t = 1 \text{ volt}$$

$$\delta H = 20 \text{ A}$$

$$\delta Q_a = 0,5 \text{ kw}$$

$$\delta D = 19 \text{ Hz}$$

$$\delta Q_c = 0,3 \text{ kw}$$

$$\delta h_a = 0,3$$

$$\delta L = \delta L_v = 1 \text{ mm}$$

$$\delta d_a = 0$$

$$\delta D_c = 5 \times 10^{-7} \text{ g/c}$$

Todavia, o que interessa são as variações detectadas nas medidas e não os seus valores "reais". Isso ocorre porque a análise dos resultados (cap.5) se fundamentará apenas em comparações entre os valores medidos nos experimentos das tabelas 3.1-a e 3.1-b. Valores medidos em outros experimentos (que não os das tabs.3.1) não serão considerados na análise. Este procedimento, além de reduzir as fontes de variações erráticas, garante que a presença de desvios sistemáticos nas respostas medidas não alterarão as conclusões da análise.

Além das tabelas 3.1-a e 3.1-b, outros resultados foram obtidos: no ap.D, as curvas de $U_t \times I$, $U_t \times G$, $Q \times I$, ...,etc, foram apresentadas. Elas mostram que o comportamento elétrico e térmico da tocha estudada nesta dissertação está em razoável acordo com as previsões da literatura^[17].

DESIGN-EASE ANALYSIS

Run Ord	Blk	A ANODO mm	B ORIF-CV mm	C EXP-CV mm	D DIAM-CV mm	R1 Ut volt	R2 Qa kw	R3 Qc kw	R4 L mm	R5 Lv mm	R6 Dc E-7g/c	Std Ord
1	1	11.20	3.80	6.50	30.00	319.0000	7.5900	1.0600	124.0000	65.0000	30.9000	6
2	1	11.20	3.80	5.50	30.00	326.0000	7.2100	1.1500	129.0000	80.0000	9.6000	18
3	1	9.60	4.20	6.50	30.00	331.0000	9.0900	1.0200	106.0000	70.0000	9.4000	23
4	1	11.20	4.20	6.50	33.00	312.0000	7.4800	1.1200	131.0000	65.0000	8.8000	32
5	1	11.20	3.80	6.50	33.00	328.0000	7.3800	0.9100	128.0000	64.0000	10.7000	30
6	1	11.20	4.20	6.50	30.00	330.0000	7.1500	1.1000	118.0000	60.0000	27.5000	24
7	1	9.60	3.80	6.50	33.00	339.0000	8.5400	0.7200	121.0000	60.0000	2.7000	13
8	1	11.20	3.80	5.50	33.00	331.0000	7.0200	1.1100	133.0000	50.0000	17.9000	26
9	1	9.60	3.80	6.50	30.00	342.0000	8.5800	0.8900	119.0000	55.0000	10.1000	5
10	1	11.20	4.20	5.50	33.00	334.0000	7.3700	1.1200	131.0000	50.0000	10.9000	12
11	1	9.60	3.80	5.50	30.00	321.0000	8.6600	0.7600	109.0000	55.0000	5.5000	1
12	1	9.60	3.80	6.50	33.00	341.0000	8.4400	0.8100	121.0000	75.0000	6.8000	29
13	1	9.60	4.20	5.50	30.00	336.0000	8.7300	0.9900	106.0000	65.0000	10.8000	3
14	1	11.20	4.20	5.50	33.00	304.0000	6.7700	0.8000	124.0000	62.0000	1.4000	28
15	1	9.60	4.20	6.50	33.00	345.0000	8.1400	0.9500	118.0000	80.0000	7.1000	15
16	1	11.20	3.80	6.50	33.00	325.0000	6.6900	1.1100	131.0000	55.0000	12.4000	14
17	1	11.20	4.20	5.50	30.00	315.0000	7.0000	1.1300	118.0000	70.0000	15.9000	4
18	1	9.60	3.80	5.50	33.00	329.0000	8.4900	0.7000	109.0000	74.0000	4.4000	25
19	1	11.20	3.80	5.50	33.00	319.0000	7.2700	1.1000	121.0000	80.0000	14.6000	10
20	1	11.20	4.20	6.50	33.00	282.0000	7.4300	1.1200	116.0000	60.0000	9.9000	16
21	1	9.60	4.20	6.50	30.00	322.0000	8.0300	0.9600	106.0000	72.0000	10.7000	7
22	1	11.20	3.80	5.50	30.00	327.0000	5.9800	0.9400	124.0000	65.0000	10.0000	2
23	1	9.60	3.80	6.50	30.00	338.0000	8.1000	0.7400	116.0000	64.0000	5.9000	21
24	1	9.60	4.20	5.50	33.00	327.0000	8.1100	0.7000	119.0000	70.0000	6.4000	27
25	1	9.60	4.20	5.50	33.00	330.0000	7.6300	0.8000	109.0000	60.0000	5.6000	11
26	1	9.60	3.80	5.50	33.00	330.0000	7.2200	0.5300	116.0000	40.0000	3.2000	9
27	1	11.20	4.20	5.50	30.00	329.0000	6.5300	1.1000	133.0000	46.0000	13.1000	20
28	1	9.60	4.20	5.50	30.00	337.0000	8.1200	1.1500	120.0000	64.0000	12.5000	19
29	1	9.60	4.20	6.50	33.00	337.0000	8.1600	0.9300	114.0000	70.0000	7.3000	31
30	1	11.20	3.80	6.50	30.00	323.0000	6.6800	0.9900	126.0000	62.0000	12.8000	22
31	1	9.60	3.80	5.50	30.00	326.0000	7.6300	0.5700	108.0000	50.0000	4.2000	17
32	1	11.20	4.20	6.50	30.00	301.0000	7.1100	1.1200	118.0000	68.0000	6.0000	8

tab.3.1-a: Resultados dos experimentos fatoriais conduzidos para avaliar os efeitos das alterações efetuadas na geometria da câmara de descarga sobre o comportamento elétrico e térmico da tocha mostrada na fig.1.1. A corrente elétrica (130 A) e a vazão de ar (G=4.5 g/s) permaneceram fixas em todos os 32 ensaios. A ordem em que os experimentos foram realizados (run order) foi randomizada.

DESIGN - EASE ANALYSIS

Run Ord	Blk	A ANODO mm	B ORIF-CV mm	C EXP-CV mm	D DIAM-CV mm	R1 H Amp	R2 D Hz	R3 ha ---	R4 da ---	Std Ord
1	1	11.20	3.80	6.50	30.00	92.0000	120.0000	1.0000	0.0000	6
2	1	11.20	3.80	5.50	30.00	83.0000	117.0000	1.8000	0.1300	18
3	1	9.60	4.20	6.50	30.00	103.0000	119.0000	1.0000	0.0000	23
4	1	11.20	4.20	6.50	33.00	89.0000	119.0000	1.5000	0.4000	32
5	1	11.20	3.80	6.50	33.00	91.0000	119.0000	1.0000	0.0000	30
6	1	11.20	4.20	6.50	30.00	89.0000	118.0000	1.8000	0.4000	24
7	1	9.60	3.80	6.50	33.00	101.0000	121.0000	1.0000	0.0000	13
8	1	11.20	3.80	5.50	33.00	97.0000	121.0000	1.5000	0.2000	26
9	1	9.60	3.80	6.50	30.00	101.0000	120.0000	1.5000	0.0300	5
10	1	11.20	4.20	5.50	33.00	91.0000	120.0000	2.0000	0.0300	12
11	1	9.60	3.80	5.50	30.00	80.0000	120.0000	1.0000	0.0000	1
12	1	9.60	3.80	6.50	33.00	94.0000	119.0000	1.0000	0.0000	29
13	1	9.60	4.20	5.50	30.00	97.0000	120.0000	1.0000	0.0000	3
14	1	11.20	4.20	5.50	33.00	71.0000	119.0000	1.0000	0.0000	28
15	1	9.60	4.20	6.50	33.00	114.0000	118.0000	1.5000	0.1700	15
16	1	11.20	3.80	6.50	33.00	75.0000	120.0000	2.2000	0.5000	14
17	1	11.20	4.20	5.50	30.00	86.0000	123.0000	1.9000	0.5000	4
18	1	9.60	3.80	5.50	33.00	100.0000	119.0000	1.0000	0.0000	25
19	1	11.20	3.80	5.50	33.00	91.0000	119.0000	1.8000	0.5000	10
20	1	11.20	4.20	6.50	33.00	78.0000	125.0000	1.7000	0.9000	16
21	1	9.60	4.20	6.50	30.00	114.0000	120.0000	1.3000	0.0300	7
22	1	11.20	3.80	5.50	30.00	85.0000	125.0000	1.6000	0.3000	2
23	1	9.60	3.80	6.50	30.00	95.0000	120.0000	1.0000	0.0000	21
24	1	9.60	4.20	5.50	33.00	97.0000	119.0000	1.0000	0.0000	27
25	1	9.60	4.20	5.50	33.00	98.0000	119.0000	1.0000	0.0000	11
26	1	9.60	3.80	5.50	33.00	101.0000	120.0000	1.0000	0.0000	9
27	1	11.20	4.20	5.50	30.00	83.0000	118.0000	2.0000	0.2000	20
28	1	9.60	4.20	5.50	30.00	106.0000	120.0000	1.5000	0.2300	19
29	1	9.60	4.20	6.50	33.00	95.0000	119.0000	1.4000	0.1700	31
30	1	11.20	3.80	6.50	30.00	92.0000	119.0000	1.7000	0.2300	22
31	1	9.60	3.80	5.50	30.00	86.0000	118.0000	1.0000	0.0000	17
32	1	11.20	4.20	6.50	30.00	85.0000	119.0000	1.6000	0.2700	8

tab. 3.1-b: Complemento da tab. 3.1-a.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E CÁLCULO DE ERROS

4.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA TOCHA DE PLASMA

Na fig. 4.1 é mostrado um esquema detalhado da tocha utilizada nesta dissertação. A geometria da câmara de descarga foi desenvolvida a partir dos resultados dos cálculos, apresentados na ref.[17], para uma tocha de 30 kW, destinada a aquecer ar comprimido à temperatura de 3000K. Pequenos ajustes foram realizados, empiricamente, com o objetivo de tornar a tocha funcional para todos os ensaios das tabelas 3.1-a e 3.1-b. Isso levou à uma geometria seguinte:

a = 10,0 mm	(diâmetro do anodo)
b = 4,0 mm	(diâmetro dos orifícios de injeção)
c = 6,0 mm	(espessura da câmara de vórtice)
d = 3,0 mm	(diâmetro da câmara de vórtice)

onde a, b, c e d têm seus significados definidos, com maior clareza, na fig.1.1.

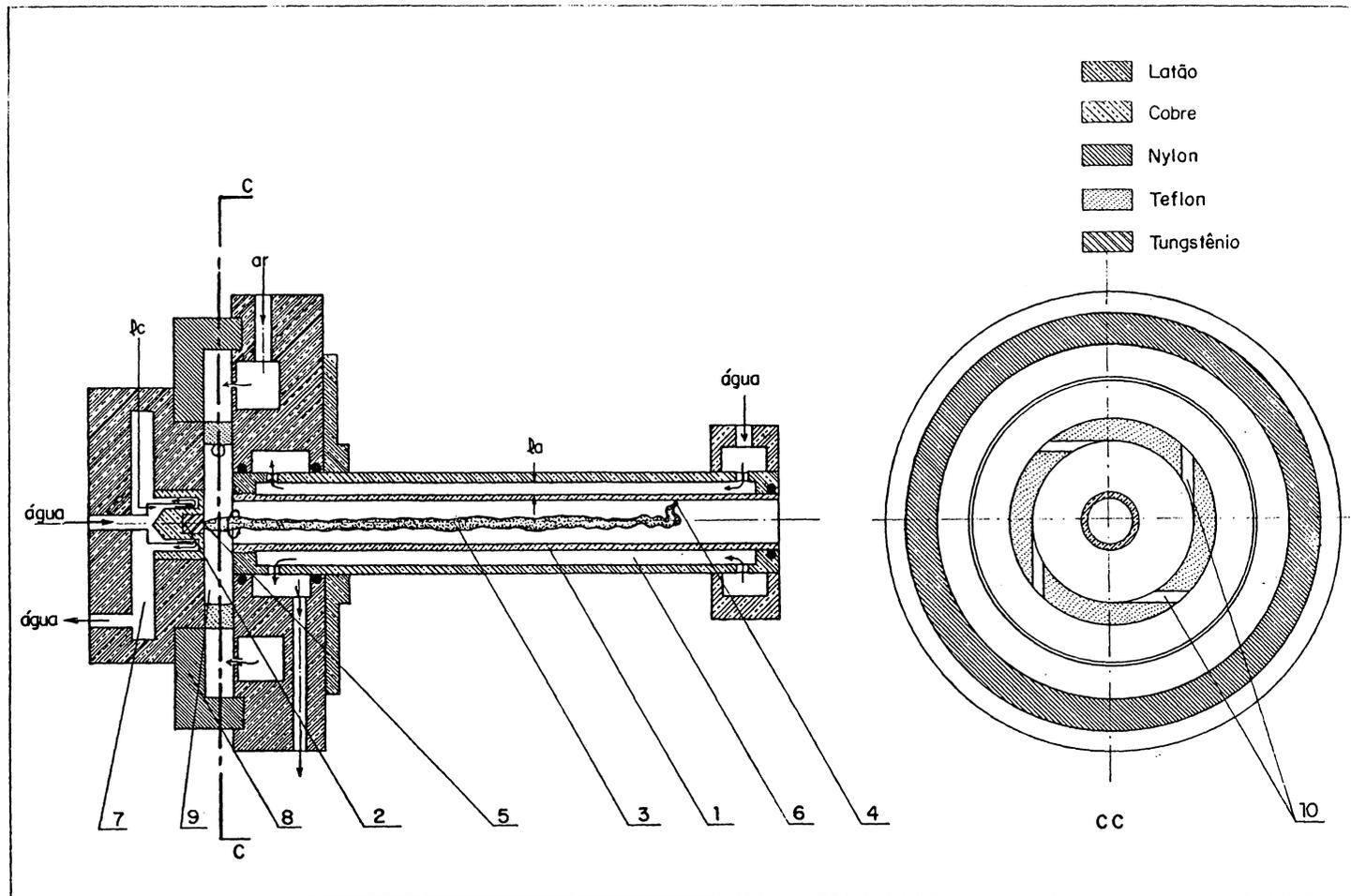


Fig. 4.1-Tocha de plasma para aquecimento de ar comprimido. 1)anodo, 2)catodo, 3)arco elétrico, 4)pé do arco sobre o anodo, 5)pé do arco sobre o catodo, 6)câmara para refrigeração do anodo, 7)câmara para a refrigeração do catodo, 8)isolador, 9)câmara de vórtice, 10)orifícios de injeção.

As câmaras para a refrigeração dos eletrodos têm suas geometrias caracterizadas pelos comprimentos l_a e l_c , definidos na fig.4.1. Os valores de l_a e l_c foram tomados de modo a garantir regime turbulento para o fluxo de água nas regiões de troca de calor. As vazões de água (no anodo e no catodo) foram dimensionadas para que a temperatura à jusante de cada eletrodo fosse inferior a 60°C .

Considerando a potência e o rendimento da tocha, a informação^[18] de que cerca de 90% das perdas térmicas seriam no anodo e somente 10% no catodo, e as características da bomba d'água empregada (tab.4.1), foram fixados, os valores seguintes para as vazões de água nos eletrodos:

$$F_{ag,a} = 4,5 \text{ l/min} \cong 75 \text{ g/s}$$

$$F_{ag,c} = 3,0 \text{ l/min} \cong 50 \text{ g/s}$$

onde, nas transformações de unidades, considerou-se a massa específica da água igual a 1 kg/l . A partir dos valores e critérios acima, foram escolhidas as geometrias das câmaras para a refrigeração dos eletrodos:

$$l_a = 1,3 \text{ mm}$$

$$l_c = 0,8 \text{ mm}$$

Para reduzir os gastos com materiais, agilizar a realização dos ensaios e facilitar as medidas de alguns parâmetros (D_c , L e L_v), foi necessário o desenvolvimento dos eletrodos mostrados na fig.4.1. Eles são facilmente

substituíveis e empregam uma quantidade mínima de materiais. O catodo consiste de um pequeno cilindro de tungstênio (com 2% de tório) encaixado, sob pressão, num suporte de cobre (ver, também, a fig.4.4). A medida do desgaste do catodo, D_c , foi facilitada pelo tamanho reduzido do conjunto (encaixe + inserte). O anodo consiste num tubo de cobre com uma rosca numa das extremidades. Após cada ensaio, ele era facilmente removido e cortado, longitudinalmente, para a efetuação das medidas de L e L_v (fig.2.1).

As partes externas da tocha foram construídas em latão porque, entre os materiais com as características elétricas e mecânicas exigidas, este era mais barato e abundante na oficina mecânica utilizada. Empregou-se teflon na confecção das câmaras de vórtice, pois esse era o único material disponível no mercado com as facilidades de usinagem e características térmicas e elétricas exigidas. Um material mais barato, o nylon, pôde ser empregado na construção do *isolador* (fig.4.1).

4.2 EQUIPAMENTOS E CIRCUITOS ACOPLADOS À TOCHA

Na fig.4.2 é mostrada uma foto da montagem utilizada nos experimentos. Só os equipamentos sobre a mesa, o resistor (em frente ao ventilador) e o osciloscópio e fazem parte do sistema. Não aparecem, na foto, a fonte de alimentação, os compressores e o sistema para bombeamento de água. Estes

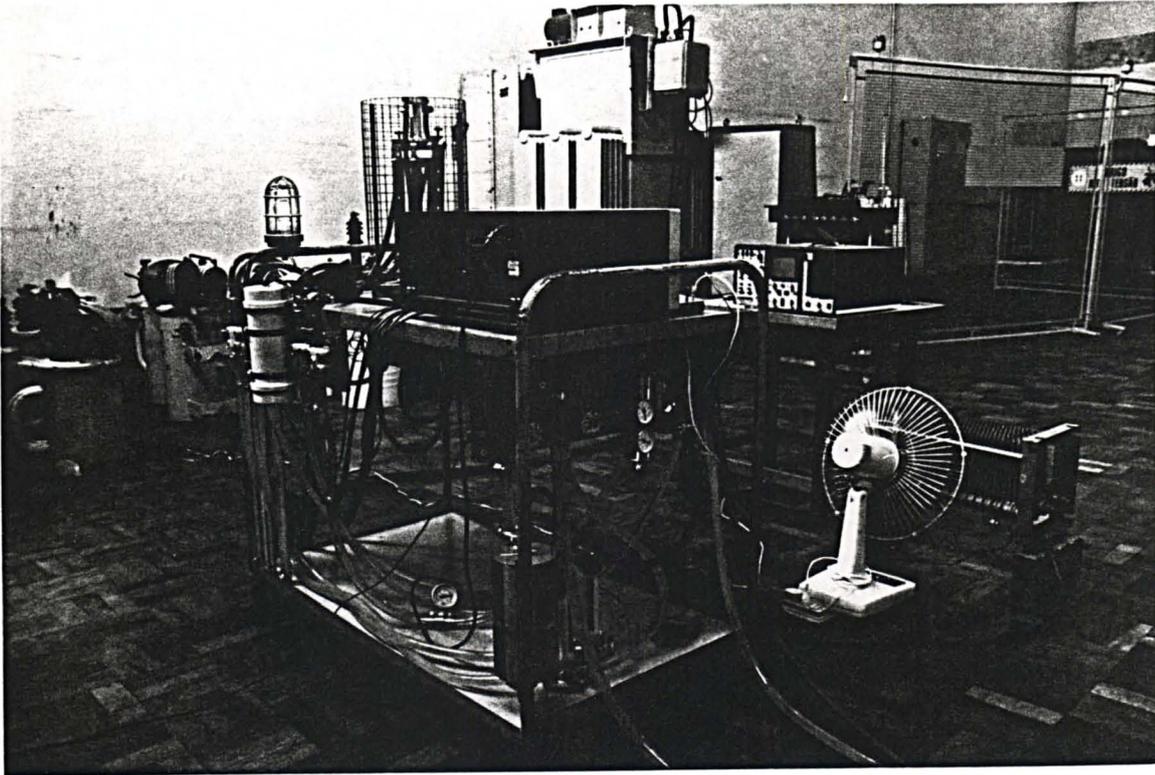


fig. 4. 2-Montagem utilizada nos experimentos deste trabalho.

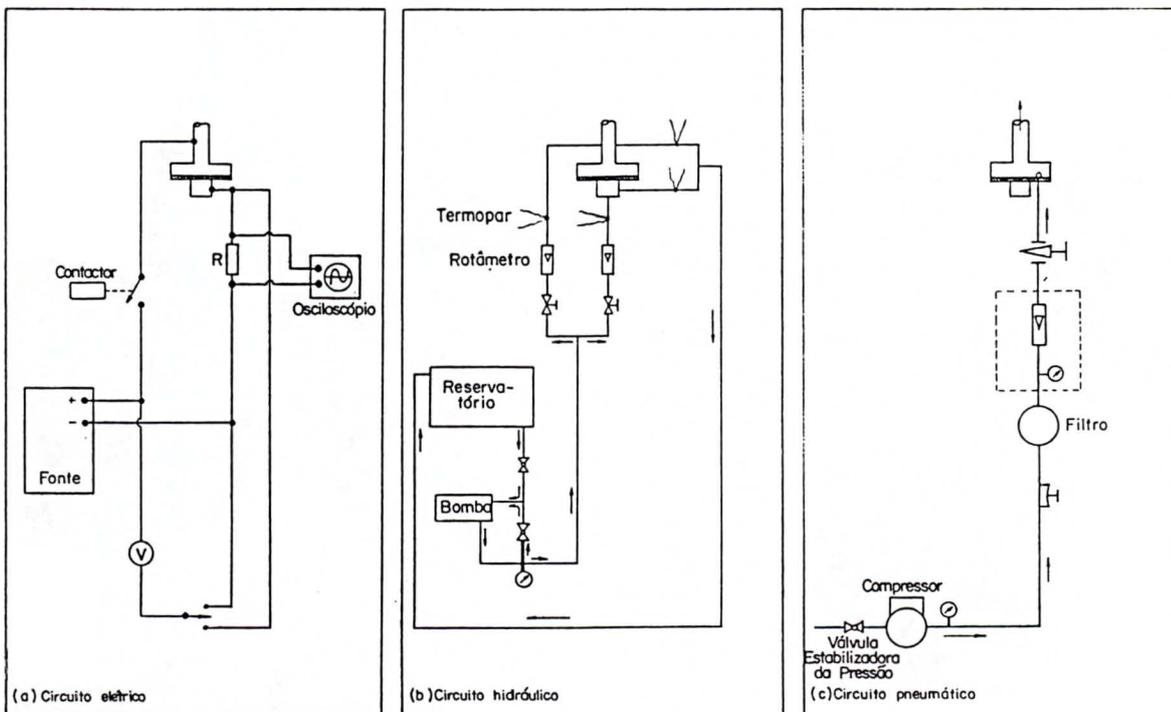


fig.4.3-Esquemas dos circuitos acoplados à tocha: a)circuito elétrico, b)circuito hidráulico e c)circuito pneumático.

equipamentos estão presentes na fig.4.3, onde são mostrados, esquematicamente, os circuitos aos quais a tocha estava acoplada. Como mostra o esquema, a montagem era constituída de três circuitos: o elétrico, o de refrigeração e o pneumático (de ar), os dois primeiros sendo fechados e o terceiro aberto. Os equipamentos para medidas e controle estavam ligados ao longo destes circuitos. A tab.4.1, abaixo, descreve as características mais importantes dos dispositivos que alimentavam os referidos circuitos:

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	fonte de potência	bomba d'água	compressores
marca	HIPOTRONICS	SHINEIDER	SHULZ
modelo	MTA4-300/MTD. 5-150	AUTOASP. BAS-60	MS-W-90/400
pres. máx.	x	4 ATM	7.5 ATM
vazão máx.	x	18 LPM	2554 LTS/MIN
U (dc)	0-500V (DC)	x	x
I (dc, máx.)	300A (DC)	x	x
alimentação	460V-AC, 400A, 3FASES, 60Hz	110/220V 3FASES+NEUTRO	440V 3FASES+NEUTRO
potência	184kw	1/3 HP	20 HP
disponibilidade	1 unidade	1 unidade	4 unidades

tab.4.1- Características dos equipamentos que alimentaram os circuitos elétrico, hidráulico e pneumático no sistema da tocha de plasma da fig. 6.

No circuito elétrico (fig.4.3-a), o contactor era usado como elemento de segurança, para desenergizar a tocha. Normalmente, a interrupção do arco era executada, a partir do painel da fonte, pelo abaixamento da tensão.

A fonte de alimentação era estabilizada em tensão e destinada a ensaios de motores. Empregou-se a carga resistiva, R, que aparece nas figs.4.1 e 4.3-a, para limitar a corrente elétrica. Em todos os ensaios, ela foi refrigerada por um

ventilador (fig.4.1) mantido sempre na mesma posição (e orientação) com relação à carga. Determinou-se o "ripple" da fonte para alguns níveis de corrente, num circuito constituído só pela fonte e a carga R. Os resultados estão no apêndice A.

O reservatório do circuito hidráulico (fig.4.3-c) consistia de uma caixa de cimento amianto com capacidade para 250 litros. Esta caixa esteve sempre bem vedada e a mesma água foi utilizada nos 32 ensaios das tabs.3.1-a e 3.1-b. A água veio de um reservatório central no laboratório, o qual era alimentado com água potável. Na fig.4.3-b, sob o reservatório, pode-se ver o sistema "by-pass" construído para controlar a pressão fornecida pela bomba ao circuito hidráulico. As vazões de água nos eletrodos foram medidas por rotâmetros e as temperaturas da água a montante e a jusante dos mesmos foram medidas através de termopares. todos esses dispositivos estão mostrados na fig.4.3. Os termopares foram instalados no circuito hidráulico entre trechos de tubos metálicos aterrados, para evitar outros sinais que não os de origem térmica.

Para evitar variações de pressão no circuito de ar comprimido, uma *válvula estabilizadora* foi instalada para permitir o funcionamento contínuo do compressor. Durante todos os ensaios, a válvula foi regulada para eliminar dos tanques dos compressores o excesso de ar alimentado pelos pistões, quando a pressão alcançava o valor necessário para manter o fluxo de ar na tocha. Um sistema de filtragem de dois estágios (a base de crina de eqüinos) foi introduzido para evitar as

impurezas mais grosseiras, tais como: poeira, óleo e excesso d'água. Para uma avaliação visual da presença de tais impurezas, utilizou-se um trecho de mangueira transparente de grande diâmetro (sob a mesa, na fig.4.2). O fluxo de ar foi medido pelo conjunto (rotametro + manômetro) representado, na fig.4.3-b, no interior de um retângulo tracejado.

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	INTERVALO DE CONFIANÇA	ESCALAS UTILIZADAS	PARÂMETROS MEDIDOS
OSCILOSCÓPIO DIGITAL	NICOLET	Nº 206 EXPLORER III	±2% DO FUNDO DE ESCALA	±10×2×10 V ±10×4×10 V	H, D, h _a e d _a
REGISTRADORA MULTICANAL	PHILIPS	PM8237A	±0.5 (°C)	0 → 100 (°C)	Q _a e Q _c
ROTÂMETROS (ÁGUA)	VEB PRÜFGERÄTE	TW-16	±0.1 (LPM)	0.2 → 4.5 (LPM)	Q _a e Q _c
ROTÂMETROS (AR)	BLUE WHITE	CF-45376 LHN	±0.5 (LPM)	1.0 → 7.5 (LPM)	G
MANÔMETRO (AR)	RECORD	—	±0.05 (kgf/cm ²)	0 → 2.0 (kgf/cm ²)	G
MULTITESTE DIGITAL	MIC	2200A	±1 (VOLT)	0 → 1000 (VOLT)	U _t
BALANÇA ANALÍTICA	SARTÓRIUS	Nº 2492	±0.1 (mg)	0 → 200 (gramas)	D _c
ESCALA MILIMÉTRICA	BANDEIRANTE	—	±1 (mm)	0 → 300 (mm)	L e L _v
TERMÔMETROS-PADRÃO (DE MERCÚRIO)	Dr. SIEBERT & KHÜLM KAL FUNGEN-KASS EL.	—	±0.1 (°C)	-12 → 52 45 → 100 (°C)	AFERIÇÃO DOS TERMOPARES

tab. 4.2-características dos equipamentos de medida, empregados na obtenção das respostas das tabs.3.1-a e 3.1-b.

Para determinar os valores das respostas nas tabs.3.1-a e 3.1-b, outros equipamentos, além dos que aparecem nos esquemas da fig.4.3, foram utilizados. A tab.4.2 é uma relação desses equipamentos, com as respectivas características e os parâmetros em cujas medidas eles foram empregados.

Graças ao osciloscópio digital, que permitiu armazenar (em disquetes) as varreduras realizadas, foi possível mostrar os gráficos das oscilações na queda de tensão através do limitador R (fig.4.2-a), nos apêndices A e C. Todos os registros foram efetuados com o auxílio de uma ponta atenuadora, de fator 10. O *intervalo de confiança* mostrado na tab.4.2 é referente ao conjunto (osciloscópio + ponta atenuadora).

Os termopares cobre-constantã (da Omega) foram soldados de acordo com as orientações encontradas na literatura^[18]. Para gerar a temperatura de referência, foi utilizado gelo fundente de água bidestilada. Os termopares foram conectados à registradora multicanal, programável para converter as tensões dos termopares cobre-constantã em temperatura e imprimir os resultados em unidades de graus célcus. Foi verificado que as curvas de calibração dos termopares obedeciam ao padrão americano da ASTM^[20] para o cobre-constantã. Os desvios estavam dentro das tolerâncias estabelecidas. O limite para os desvios nas medidas de temperatura, realizadas pelo conjunto (termopares + registradora + referência), está indicado (tab.4.2) na linha correspondente à *registradora multicanal*. Este limite foi obtido medindo-se a temperatura da água numa

garrafa térmica, à medida que ela era resfriada (de 80 para 20°C) pela adição de pequenos pedaços de gelo. As medidas foram feitas, simultaneamente, com um termômetro-padrão de coluna de mercúrio (tab.4.2) e cada um dos quatro termopares mostrados na fig.4.3. As soldas dos termopares foram locadas o mais próximo possível do bulbo do termômetro-padrão e, ainda, em cada observação aguardou-se o equilíbrio térmico se estabelecer no interior da garrafa térmica. O valor mostrado na tab.4.2 (0.5°C) representa a discrepância máxima observada entre o valor fornecido pela registradora e a posição da coluna de mercúrio no termômetro-padrão.

4.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS E CÁLCULOS DE ERROS

Cada um dos 32 experimentos das tabs.3.1-a e 3.1-b teve duração de aproximadamente 16 minutos. Cada resposta (R_1, R_2, \dots, R_{10}) foi expressa por um valor característico, determinado a partir de observações realizadas ao longo de cada ensaio. Conforme planejado no capítulo 2, a vazão de ar e a corrente elétrica foram mantidas fixas durante todos os ensaios das tabs.3.1. Restrições eram impostas sobre os valores de I e G, seja pela presença de fortes instabilidades (que interrompiam os ensaios), ou pelas limitações da fonte de alimentação (tab.4.1). Os valores:

$$I = 130 \text{ A}$$

$$G = 4.5 \text{ g/s}$$

foram escolhidos de modo a viabilizarem a realização de todos os ensaios.

Três pessoas operaram o sistema (figs.4.2 e 4.3) durante a realização dos experimentos e a rotina dos procedimentos foi a seguinte:

a) preparativos iniciais:

- medida a massa, m_c , do catodo;
- ajuste das vazões de água e de ar e da tensão sobre a tocha;
- ajuste do papel na registradora, à qual estavam ligados os termopares;
- engatilhamento do osciloscópio para registrar a ignição da tocha;

b) ignição da tocha (por curto circuito provocado por um fio de cobre fino introduzido entre os eletrodos);

c) ajuste simultâneo da vazão de ar (4.5g/s) e da corrente elétrica através da tocha (130A);

d) disparo da registradora ligada aos termopares e efetuação das leituras da corrente e da queda de tensão através da tocha;

e) simultaneamente com as leituras de temperatura, feitas automaticamente pela registradora a cada 2 minutos, aferição das vazões de ar e de água, leitura da queda de tensão e da corrente elétrica através da tocha e realização dos registros, de osciloscópio, da tensão sobre o limitador de

corrente;

- f) imediatamente após a oitava leitura das respostas, interrupção do arco, pelo abaixamento da tensão fornecida pela fonte de alimentação
- g) desmontagem da tocha, para as medidas de m_c (massa do catodo após o ensaio), L e L_v .

Será descrito, a seguir, como se obteve os valores de cada resposta das tabs.3.1-a e 3.1-b.

Os valores do comprimento, L , do arco, foram obtidos somando-se a espessura da câmara de vórtice (fig.1.1) à distância entre a borda do anodo que contém a rosca (fig.4.1) e a marca na região central do rastro deixado pelo arco (fig.2.1). Os valores de L_v , correspondem à distância entre os dois extremos do rastro deixado pelo arco (fig.2.1). Ambos, L e L_v , foram medidos com uma escala milimétrica (tab.4.2).

A massa, m_c , do catodo (fig.4.4) foi medida, antes e depois da realização de cada ensaio, utilizando-se uma balança analítica com precisão até décimos de miligramas (tab.4.2). O desgaste específico, D_c , foi calculado através da fórmula:

$$D_c = \frac{\Delta m_c}{I_f \cdot t} \quad (27)$$

onde Δm_c é a variação na massa do catodo durante o ensaio, I_f é a corrente elétrica (constante) lida no painel da fonte e t a duração do ensaio. A diferencial total da fórmula (27)

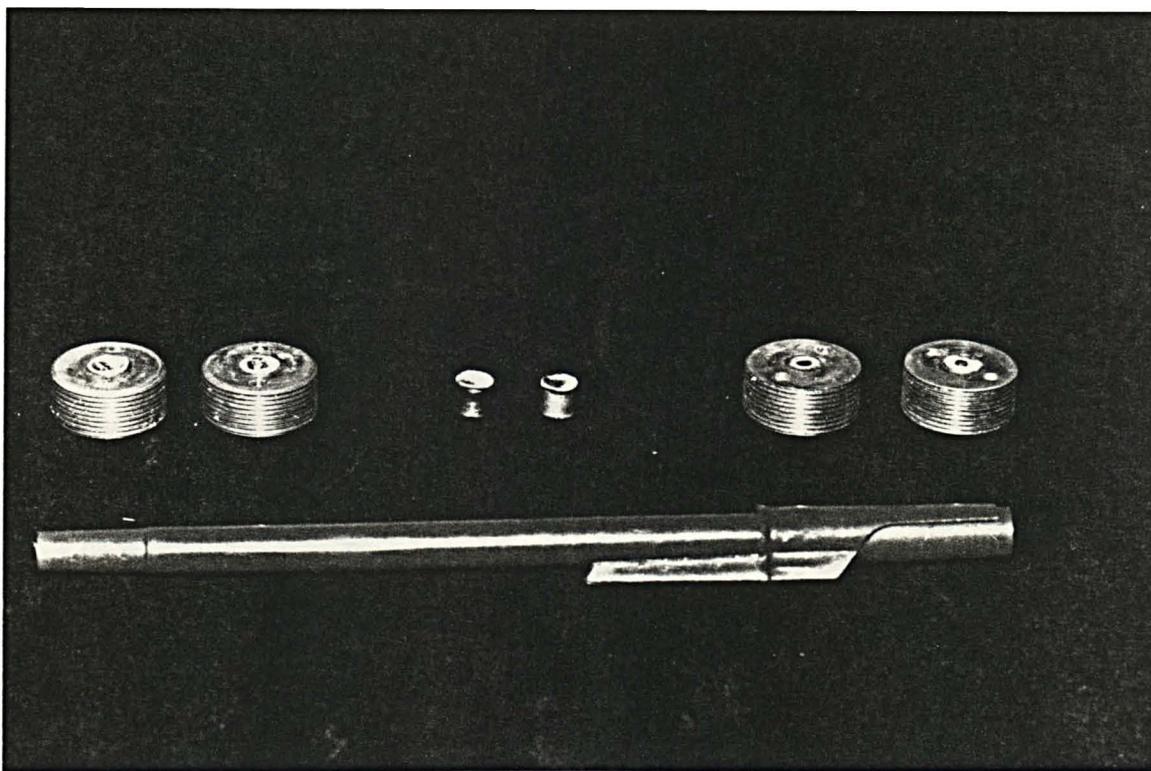


fig.4.4-Catodos utilizados em experimentos da tab.1. São constituídos de um inserte de tungstênio (com 2% de tório) encaixado num suporte de cobre.

fornece uma aproximação para o erro propagado^[21] no cálculo do desgaste específico, δD_c :

$$\delta D_c \cong (1/I_f t) \delta \Delta mc + (\Delta mc / I_f^2 t) \delta I_f + (\Delta mc / I_f t^2) \delta t \quad (28)$$

O erro máximo em D_c é obtido quando se substitui, em (28), o valor máximo medido para Δmc :

$$\Delta mc_{\text{máx}} = 409,2 \times 10^{-9} \text{ g}$$

A corrente I_f , a duração dos ensaios t e os limites dos erros instrumentais ($\delta\Delta mc$, δI_f e δt) permaneceram fixos durante os experimentos:

$$\begin{aligned} I_f &= 130A \\ t &= 16\text{min.} = 960 \text{ seg.} \\ \delta\Delta mc &= 2\delta mc = 0,2 \times 10^{-3} \text{ g} \\ \delta I_f &= 10A \\ \delta t &= 60\text{seg} \end{aligned}$$

O valor de 60 segundos para a incerteza nas medidas de tempo foi introduzida devido às dificuldades durante a ignição da tocha: em alguns ensaios foram necessárias em torno de 15 tentativas de ignição nas quais, após poucos segundos, a tocha se "apagava". Com os valores acima, obtém-se:

$$\delta D_c = 4,6 \times 10^{-7} \text{ g/c} \quad (29)$$

Este é o valor máximo dos erros nos valores medidos para D_c , nas tabs.3.1-a e 3.1-b. Este erro é realmente grande, mas, reiterando o que está justificado no final do capítulo 3, não são os valores "reais" de D_c que importam na análise (cap.5), mas sim as variações observadas em D_c , ao longo dos ensaios das tabs.3.1.

A taxa do calor perdido para o anodo é dada por:

$$Q_a = F_{ag,a} C_{ag} \Delta T_a + Q_{t,a} \quad (30)$$

onde $Q_{t,a}$ é a taxa do calor perdido para as tubulações antes da água atingir o termopar à jusante do anodo (fig.4.3-b). Uma fórmula análoga é válida para o catodo:

$$Q_c = F_{ag,c} C_{ag} \Delta T_c + Q_{t,c} \quad (31)$$

No apêndice A, vê-se que somente a correção $Q_{t,c}$ é importante, $Q_{t,a}$ podendo ser ignorada nos cálculos de Q_a .

Não foram realizadas medidas para o calor específico, C_{ag} , da água de refrigeração. Em vez disso, procurou-se garantir um desvio constante no valor tomado para C_{ag} : utilizou-se a mesma água em todos os ensaios das tabs.3.1 e, nos cálculos de (30) e (31), foi empregado o valor referente à água pura, à temperatura de 15°C:

$$C_{ag} = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} = 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

Este procedimento foi adotado pelo fato de desvios fixos nas respostas das tabs.3.1 não afetarem as conclusões da análise (no cap.5), como já foi explicado no penúltimo parágrafo do capítulo 3.

Os acréscimos nas temperaturas das águas do anodo e do catodo, ΔT_a e ΔT_c , nas equações (30) e (31), foram medidos, automaticamente, pela registradora multicanal programável, listada na tab.4.2. À registradora foram conectados os terminais dos termopares cobre-constantã, ligados à montante e à jusante dos eletrodos da tocha (fig.4.3). O intervalo de

confiança para as medidas realizadas pelo conjunto (registradora + termopares + referência) foi de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Os fluxos de água no anodo e no catodo, $F_{ag,a}$ e $F_{ag,c}$, foram medidos por dois rotâmetros. O passo nas escalas utilizadas está indicado na tab.4.2 (0,1 l/min).

Os desvios propagados nos cálculos de Q_a e Q_c (tabs.3.1-a e 3.1-b) a partir das fórmulas (30) e (31) são dados, aproximadamente, por:

$$\delta Q_a \cong C_{ag} (F_{ag,a} \delta \Delta T_a + \Delta T_a \delta F_{ag,a}) \quad (32)$$

$$\delta Q_c \cong C_{ag} (F_{ag,c} \delta \Delta T_c + \Delta T_c \delta F_{ag,c}) + \delta Q_{t,c} \quad (33)$$

onde, para $\delta Q_{t,c}$, pode-se tomar a média quadrática, $\sigma_{\Delta T}$, dos desvios dos pontos experimentais (variância) em torno da curva ajustada para $\Delta T_{t,c}$ (apêndice A), multiplicada pelo fluxo de água no catodo e pelo calor específico, C_{ag} , da água:

$$\delta Q_{t,c} = \sigma_{\Delta T} \cdot F_{ag,c} \cdot C_{ag}$$

O desvio $\delta Q_{t,c}$ e os outros parâmetros de (32) e (33) que permaneceram constantes ao longo dos experimentos, tiveram, então, os valores seguintes:

$$\delta Q_{t,c} \cong 42 \text{ W}$$

$$F_{ag,a} = 4,5 \text{ l/min} \cong 75 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$F_{ag,c} = 3,0 \text{ l/min} \cong 50 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$\delta\Delta T = 2\delta T = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\delta F_{\text{ág}} = 0,1 \text{ l/min} = 1,7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$C_{\text{ág}} = 4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

Os valores máximos medidos para ΔT_{α} e ΔT_{c} foram:

$$\Delta T_{\alpha, \text{máx.}} = 28,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{c}, \text{máx.}} = 5,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Substituindo os valores acima em (32) e (33) obtêm-se os limites superiores para os desvios em Q_{α} e Q_{c} :

$$\delta Q_{\alpha} < 520 \text{ W} \cong 0,5 \text{ kw} \quad (34)$$

$$\delta Q_{\text{c}} < 289 \text{ W} \cong 0,3 \text{ kw} \quad (35)$$

a menos dos desvios nos valores utilizados para o calor específico e para a massa específica da água.

Os parâmetros que caracterizam a estabilidade da tocha (H , D , h_{α} e d_{α}) foram obtidos a partir de registros análogos aos do apêndice C, ao da fig.2.2, e ao da fig.4.5. Estas curvas foram obtidas através do osciloscópio digital da tab.4.2, ligado sobre a carga resistiva, R , que limitou a corrente elétrica no circuito da tocha (fig.4.3).

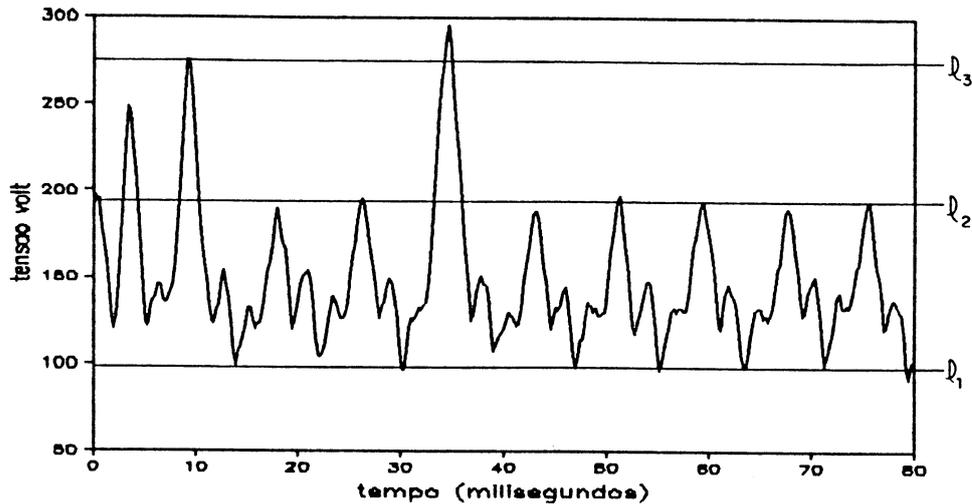


fig.4.5-Oscilações na tensão sobre a carga resistiva, $R (=1.08 \Omega)$, empregada para limitar a corrente elétrica através da tocha (fig.4.3). Este registro corresponde à 3ª leitura da corrida 16, com a geometria acd (tabs.3.1).

Os valores de H , D , h_a e d_a foram calculados através das fórmulas (24). Os valores médios extremos da tensão foram determinados através do alinhamento (visual) de um objeto retilíneo através das extremidades dos picos, de acordo com as definições apresentadas na secção 2.1. As linhas l_1 , l_2 e l_3 , nas figs.4.5 e 2.2 ilustram o resultado de tal procedimento. Nas equações (24), para as incertezas nos valores de h , T_p , B_p , N_a e N_p , tomou-se:

$\delta T_p \cong \delta B_p = 10A =$ metade da amplitude máxima observada das variações ao longo da linha média traçada no teto ou na base dos picos;

$\delta h = 30A =$ metade da amplitude máxima observada das variações ao longo da linha média traçada através dos extremos dos picos anômalos;

$\delta N_a = \delta N_p = 0$ (por N_a e N_p serem quantidades discretas);

$\delta R \cong 0,005 \Omega$ = média quadrática dos desvios dos pontos experimentais em torno do ajuste $R \times I$, mostrado na fig.A-1 (apêndice A).

De (24), obtêm-se:

$$\delta H \cong (T_p - B_p) \delta R / R^2 + 2 \delta T_p / R \quad (36)$$

$$\delta D \cong N_p \cdot \delta t / t^2 \quad (37)$$

$$\delta h_a \cong \delta h / T_p + h \cdot \delta T_p / T_p^2 \quad (38)$$

$$\delta d_a \cong \delta N_a / N_p + N_a \cdot \delta N_p / N_p^2 \quad (39)$$

onde δt é a incerteza nos valores da escala de tempo do osciloscópio (tab.4.2). Os valores máximos obtidos para estes desvios, durante os cálculos de H, D, h_a e d_a nas tabs.3.1-a e 3.1-b, foram:

$$\delta H < 20 \text{ A}$$

$$\delta D < 19 \text{ Hz}$$

$$\delta h_a < 0,3$$

$$\delta d_a = 0$$

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise que segue, os cálculos foram efetuados pelo programa *DESIGNE EASE*, vendido em escala comercial para ser usado em microcomputadores. Este programa é fundamentado em teoria e exemplos apresentados na ref.[12]. Na ref.[13], mostra-se alguns exemplos que ilustram o uso desse tipo de "software" na análise de experimentos fatoriais.

Para cada resposta das tabs.3.1-a e 3.1-b, uma análise é apresentada em termos dos itens seguintes:

- a) representação gráfica, nos vértice de dois cubos, das respostas médias correspondentes às 16 combinações dos níveis das variáveis estudadas. Num cubo, são mostradas as respostas médias referentes ao nível "baixo" do diâmetro da câmara de vórtice, $d(-)$, e, no outro, as respostas médias relativas ao nível "alto", $d(+)$.
- b) *ANOVA*, que é uma listagem com os resultados da análise de variância.
- c) *diagrama-metade de probabilidade normal* (Half Normal Probability plot), utilizado na decisão de incluir,

ou não, cada uma das várias parcelas do modelo estatístico utilizado na análise (apêndice E).

- d) apresentação dos *resíduos* e de três diagramas (a, b e c) para a avaliação da validade das hipóteses relativas ao modelo empregado na análise.
- e) resumo com conclusões e observações relativas aos resultados da análise.

Nas *ANDVAS*, o teste *t-de student* (que foi empregado para separar, do ruído experimental, os efeitos (A, B, AB, ..., ABCD) das variáveis estudadas (a, b, c, e d)), é equivalente ao teste *F*, destinado à comparação de variâncias e usualmente empregado quando o número de níveis tomados para as variáveis é maior que 2.

Nas conclusões do item (e) utiliza-se o *nível de significância*, α , dos testes *t-de students*:

$$\alpha = 100\% - (\text{PROB} > |t|)$$

com os critérios seguintes:

- a) $\alpha > 98\%$ → assume-se a ocorrência do efeito;
- b) $90\% < \alpha < 98\%$ → considera-se o efeito possível;
- c) $\alpha < 90\%$ → considera-se o efeito não existente;

onde, no caso do item (b), a real existência do efeito deve ser confirmada por novos experimentos.

Os critérios acima são coerentes com a natureza iterativa da abordagem empregada nesta dissertação (seção 1.3) para incrementar as eqs. (19) e (20) com parâmetros

importantes para o desempenho da tocha da fig.4.1. As conclusões da análise constituem os resultados da etapa (c) da referida abordagem (pag.15).

No item (d), os pontos do diagrama (a) devem ocorrer distribuídos ao longo de uma reta para que a "normalidade" dos resíduos seja assegurada. Um ponto muito distante da reta ajustada é denominado "outlier"^[12,13] e o ensaio correspondente deve ser repetido. Neste trabalho, adota-se os critérios recomendados na ref.[13]: pontos com desvio standard maior que 3 são considerados "outliers".

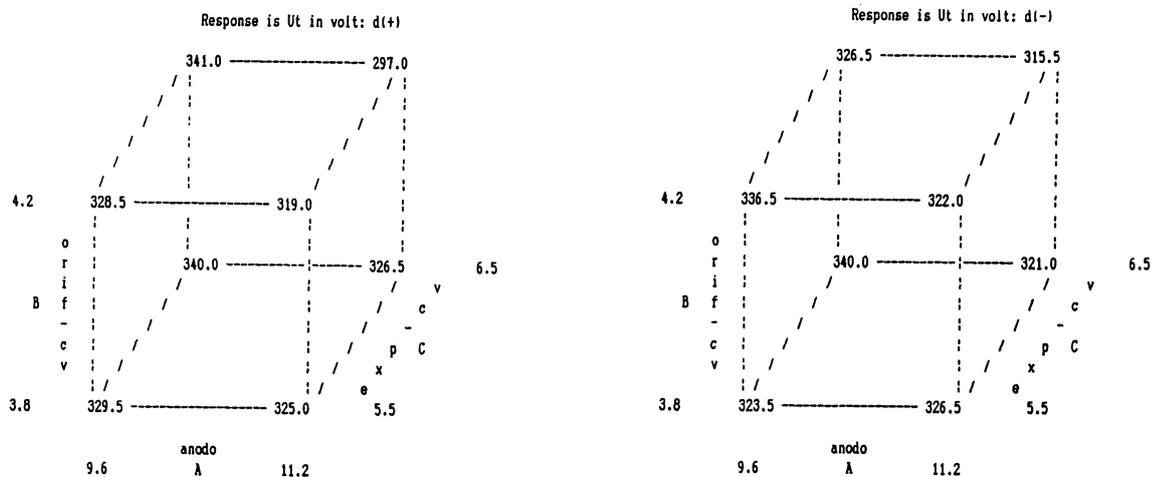
No diagrama (b), um espalhamento randômico dos pontos garante a independência dos resíduos. A presença de alguma estrutura na distribuição dos pontos indicaria a existência de correlação entre a magnitude dos resíduos e os valores medidos e pode afetar as conclusões da análise. Tal estrutura poderia ser eliminada por uma adequada transformação de escala, aplicada sobre os valores medidos^[12,13].

No diagrama (c), a presença de algum padrão na distribuição dos pontos indicaria que alguma variável não controlada evoluiu ao longo da realização dos ensaios. Tais estruturas poderiam ser eliminadas pela identificação e controle da variável responsável, o que proporcionaria um aumento na precisão da análise.

No restante deste capítulo, apresenta-se as análises efetuadas sobre as respostas cujas medidas estão nas tabelas 3.1-a e 3.1-b. No apêndice E apresenta-se uma descrição mais detalhada dos elementos que compõem as análises que seguem.

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE U_t

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

fig. 5. 1-Representação gráfica dos valores medidos para U_t , na tab. 3. 1-a.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	2966.375000	5	593.2750000	6.926	0.0003
ERROR	2227.125000	26	85.6586538		
COR TOTAL	5193.500000	31			
ROOT MSE	9.255196		R-SQUARED	0.5712	
DEP MEAN	326.125000		ADJ R-SQUARED	0.4887	
C. V.	2.84 %				
VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	326.125000	1		199.330	0.0001
A	-7.062500	1	1596.125000	-4.317	0.0002
B	-2.875000	1	264.500000	-1.757	0.0907
AC	-3.875000	1	480.500000	-2.368	0.0256
BC	-3.062500	1	300.125000	-1.872	0.0725
ABCD	-3.187500	1	325.125000	-1.948	0.0623
Std ERROR	1.6361030				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

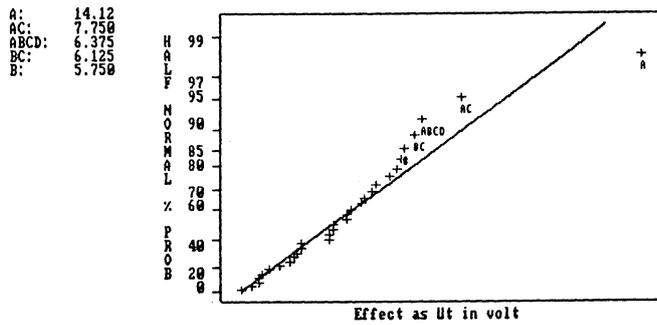


fig.5.2-Módulos dos efeitos sobre U_t , versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std	ACTUAL	PREDICTED	STANDARDIZED	COOK's	t	Run	
Ord	VALUE	VALUE	RESIDUAL	RESIDUAL	D	VALUE	
1	321.000000	325.937500	-4.937500	-0.5918	0.013	-0.584	11
2	327.000000	325.937500	1.062500	0.1274	0.001	0.125	22
3	336.000000	332.687500	3.312500	0.3971	0.006	0.391	13
4	315.000000	319.937500	-4.937500	-0.5918	0.013	-0.584	17
5	342.000000	346.187500	-4.187500	-0.5019	0.010	-0.495	9
6	319.000000	317.937500	1.062500	0.1274	0.001	0.125	1
7	322.000000	327.937500	-5.937500	-0.7117	0.019	-0.705	21
8	301.000000	312.437500	-11.437500	-1.3710	0.072	-1.396	32
9	330.000000	332.312500	-2.312500	-0.2772	0.003	-0.272	26
10	319.000000	319.562500	-0.562500	-0.0674	0.000	-0.066	19
11	330.000000	326.312500	3.687500	0.4420	0.008	0.435	25
12	334.000000	326.312500	7.687500	0.9215	0.033	0.919	10
13	339.000000	339.812500	-0.812500	-0.0974	0.000	-0.096	7
14	325.000000	324.312500	0.687500	0.0824	0.000	0.081	16
15	345.000000	334.312500	10.687500	1.2811	0.063	1.298	15
16	282.000000	306.062500	-24.062500	-2.8843	0.320	-3.430	20
17	326.000000	325.937500	0.062500	0.0075	0.000	0.007	31
18	326.000000	325.937500	0.062500	0.0075	0.000	0.007	2
19	337.000000	332.687500	4.312500	0.5169	0.010	0.510	28
20	329.000000	319.937500	9.062500	1.0863	0.045	1.090	27
21	338.000000	346.187500	-8.187500	-0.9814	0.037	-0.981	23
22	323.000000	317.937500	5.062500	0.6068	0.014	0.599	30
23	331.000000	327.937500	3.062500	0.3671	0.005	0.361	3
24	330.000000	312.437500	17.562500	2.1052	0.170	2.266	6
25	329.000000	332.312500	-3.312500	-0.3971	0.006	-0.391	18
26	331.000000	319.562500	11.437500	1.3710	0.072	1.396	8
27	327.000000	326.312500	0.687500	0.0824	0.000	0.081	24
28	304.000000	326.312500	-22.312500	-2.6746	0.275	-3.080	14
29	341.000000	339.812500	1.187500	0.1423	0.001	0.140	12
30	328.000000	324.312500	3.687500	0.4420	0.008	0.435	5
31	337.000000	334.312500	2.687500	0.3221	0.004	0.317	29
32	312.000000	306.062500	5.937500	0.7117	0.019	0.705	4

e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

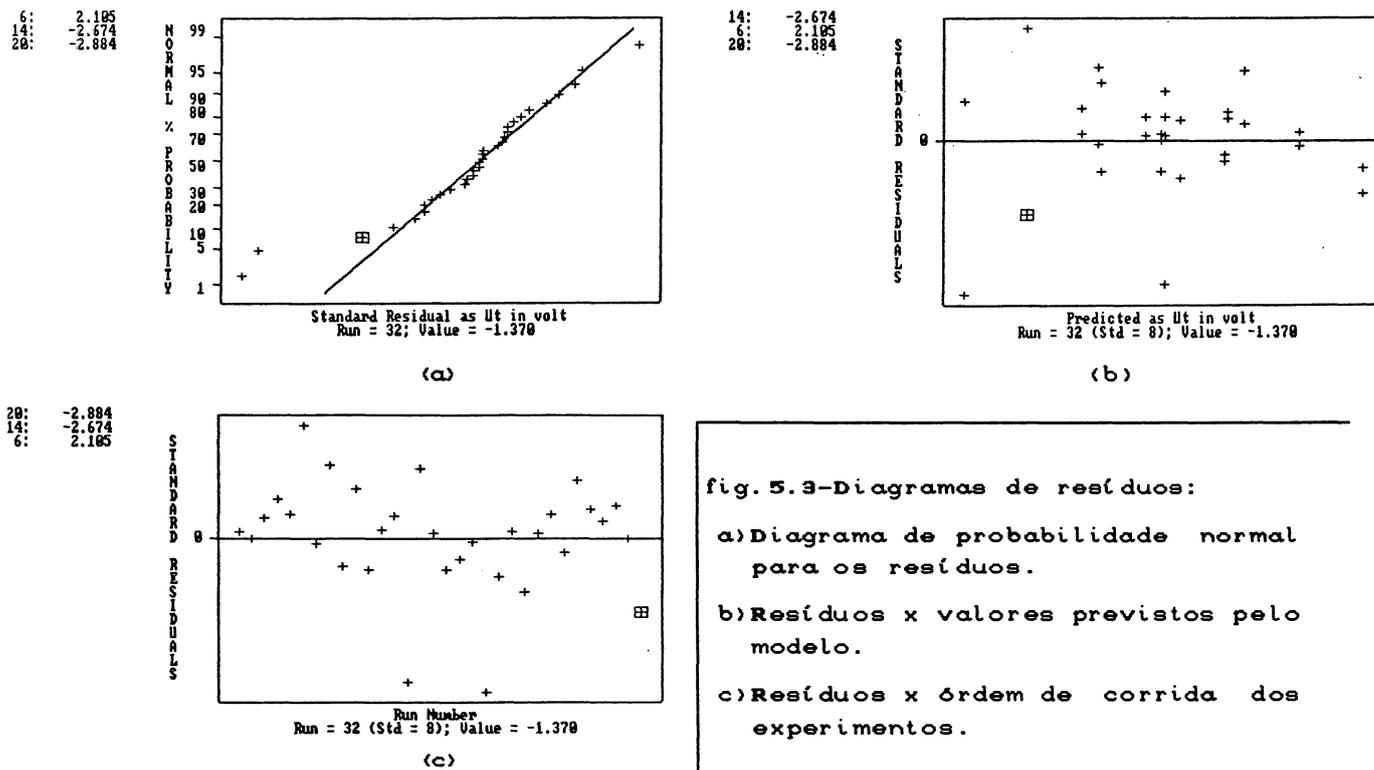


fig. 5.3-Diagramas de resíduos:

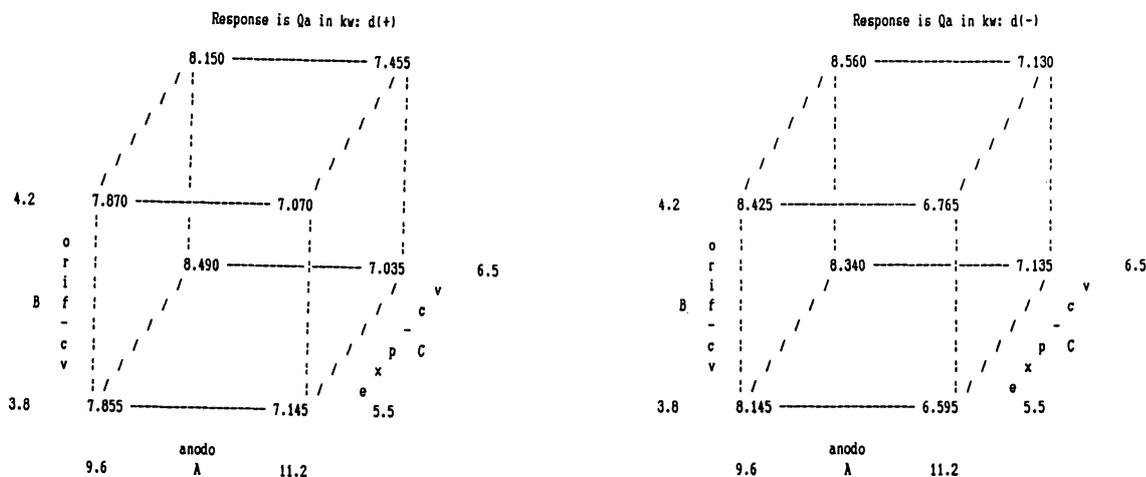
- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 326 + (-7)i + (-3)j + (-4)ik + (-3)jk + (-3)ijkl$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	Os resíduos relativos às corridas 14 e 20 são consideravelmente grandes e indicam que as geometrias correspondentes devem ser observadas com maior atenção em trabalhos futuros. Exceto por estes dois fortes candidatos a "outliers" (ref.8), nenhum outro fato ocorreu nos diagramas de resíduos no sentido de abalar as hipóteses (ver apêndice F) subjacentes à análise.
RESULTADOS DA ANOVA	Com segurança, a ANOVA permite assumir apenas que o diâmetro do anodo tem efeito sobre a queda de tensão, U_t , através da tocha. Há forte indicação da existência de outros efeitos (B, AC, BC e ABCD), mas eles devem ser verificados num outro projeto de experimentos em que a variância errática seja reduzida e/ou o número de repetições dos ensaios aumentados (ref.7).

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE Q_a

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

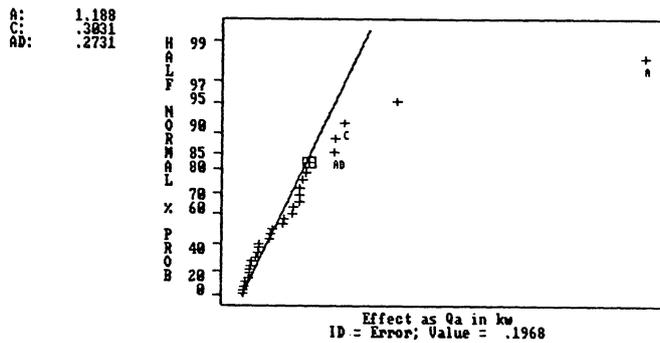
fig. 5.4-Representação gráfica dos valores medidos para Q_a , na tab. 3.1-a.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	12.624984	3	4.2083281	25.116	0.0001
ERROR	4.691612	28	0.1675576		
COR TOTAL	17.316597	31			
ROOT MSE	0.409338		R-SQUARED	0.7291	
DEP MEAN	7.635312		ADJ R-SQUARED	0.7000	
C. V.	5.36 %				
VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	7.635312	1		105.516	0.0001
A	-0.594062	1	11.293128	-8.210	0.0001
C	0.151562	1	0.735078	2.095	0.0454
AD	0.136562	1	0.596778	1.887	0.0695
Std ERROR	0.0723614				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

fig.5.5-Módulos dos efeitos sobre Q_a , versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK'S D	t VALUE	Run Ord
1	8.660000	8.214375	0.445625	1.1638	0.048	1.172	11
2	5.980000	6.753125	-0.773125	-2.0191	0.146	-2.145	22
3	8.730000	8.214375	0.515625	1.3466	0.065	1.367	13
4	7.000000	6.753125	0.246875	0.6447	0.015	0.638	17
5	8.580000	8.517500	0.062500	0.1632	0.001	0.160	9
6	7.590000	7.056250	0.533750	1.3940	0.069	1.419	1
7	8.030000	8.517500	-0.487500	-1.2732	0.058	-1.288	21
8	7.110000	7.056250	0.053750	0.1404	0.001	0.138	32
9	7.220000	7.941250	-0.721250	-1.8836	0.127	-1.979	26
10	7.270000	7.026250	0.243750	0.6366	0.014	0.630	19
11	7.630000	7.941250	-0.311250	-0.8129	0.024	-0.808	25
12	7.370000	7.026250	0.343750	0.8978	0.029	0.895	10
13	8.540000	8.244375	0.295625	0.7721	0.021	0.766	7
14	6.690000	7.329375	-0.639375	-1.6698	0.100	-1.728	16
15	8.140000	8.244375	-0.104375	-0.2726	0.003	-0.268	15
16	7.430000	7.329375	0.100625	0.2628	0.002	0.258	20
17	7.630000	8.214375	-0.584375	-1.5262	0.083	-1.565	31
18	7.210000	6.753125	0.456875	1.1932	0.051	1.203	2
19	8.120000	8.214375	-0.094375	-0.2465	0.002	-0.242	28
20	6.530000	6.753125	-0.223125	-0.5827	0.012	-0.576	27
21	8.100000	8.517500	-0.417500	-1.0904	0.042	-1.094	23
22	6.680000	7.056250	-0.376250	-0.9826	0.034	-0.982	30
23	9.090000	8.517500	0.572500	1.4952	0.080	1.531	3
24	7.150000	7.056250	0.093750	0.2448	0.002	0.241	6
25	8.490000	7.941250	0.548750	1.4331	0.073	1.462	18
26	7.020000	7.026250	-0.006250	-0.0163	0.000	-0.016	8
27	8.110000	7.941250	0.168750	0.4407	0.007	0.434	24
28	6.770000	7.026250	-0.256250	-0.6692	0.016	-0.662	14
29	8.440000	8.244375	0.195625	0.5109	0.009	0.504	12
30	7.380000	7.329375	0.050625	0.1322	0.001	0.130	5
31	8.160000	8.244375	-0.084375	-0.2204	0.002	-0.217	29
32	7.480000	7.329375	0.150625	0.3934	0.006	0.387	4

e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

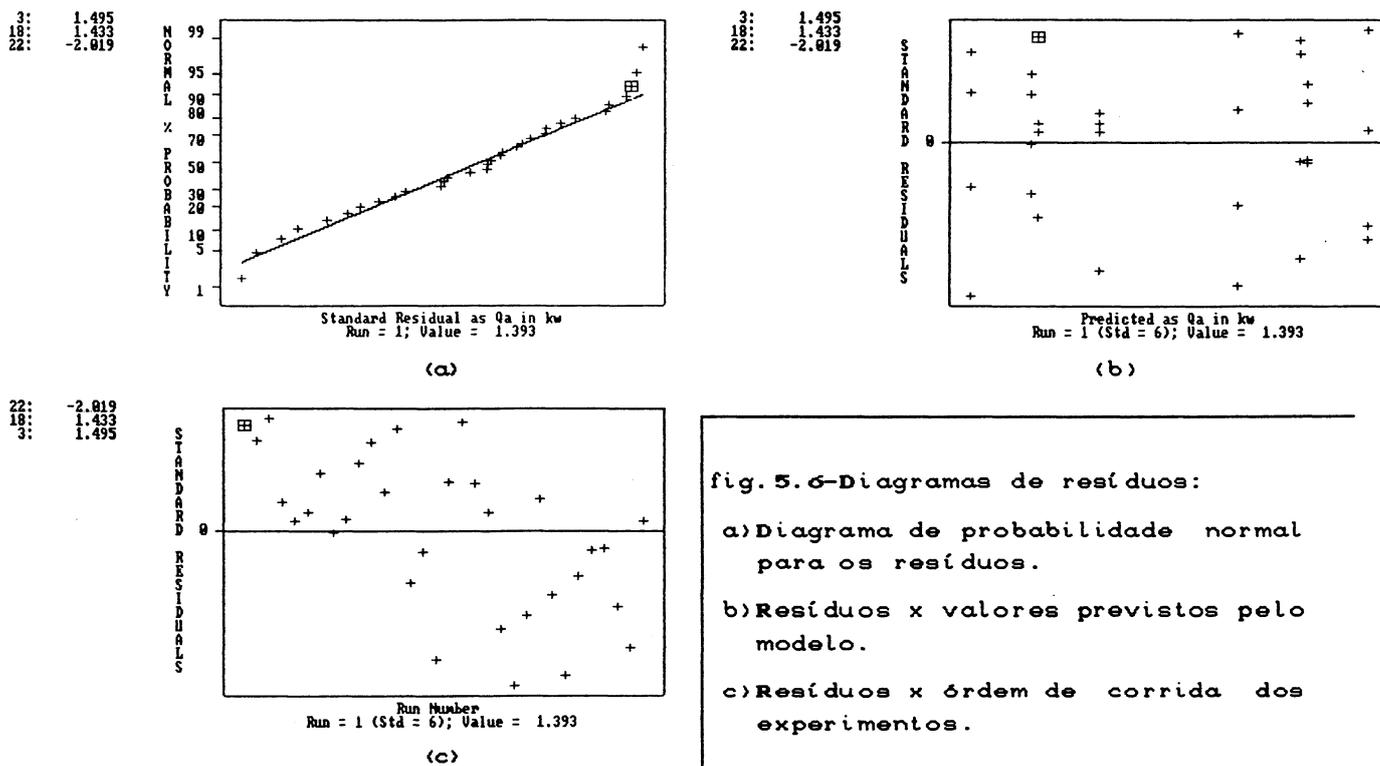


fig. 5.6-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 7.63 + (-0.59)i + (0.15)k + (0.14)il$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	Nos diagramas dos resíduos, há apenas um problema com relação à hipótese de que as variações erráticas (ϵ_{ijkl}) na equação f-1 (do apêndice F) são NID (Normal e Independentemente Distribuídos): o diagrama "resíduos Standard x ordem de corrida" sugere que alguma variável "ambiental" não controlada provocou um "drift" sobre as medidas de Q_a , com os valores medidos nos primeiros ensaios sendo maiores que os medidos nos últimos. Então, em experimentos futuros, a dispersão nas medidas de Q_a pode ser reduzida pela identificação e controle dessa variável
RESULTADOS DA ANOVA	O efeito, A, do diâmetro do anodo sobre a taxa do fluxo de calor para o anodo é detectado com alto nível de significância. Já os efeitos de C e AD não são tão fortes e estudos adicionais serão necessários para confirmá-los.

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE Q_c

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

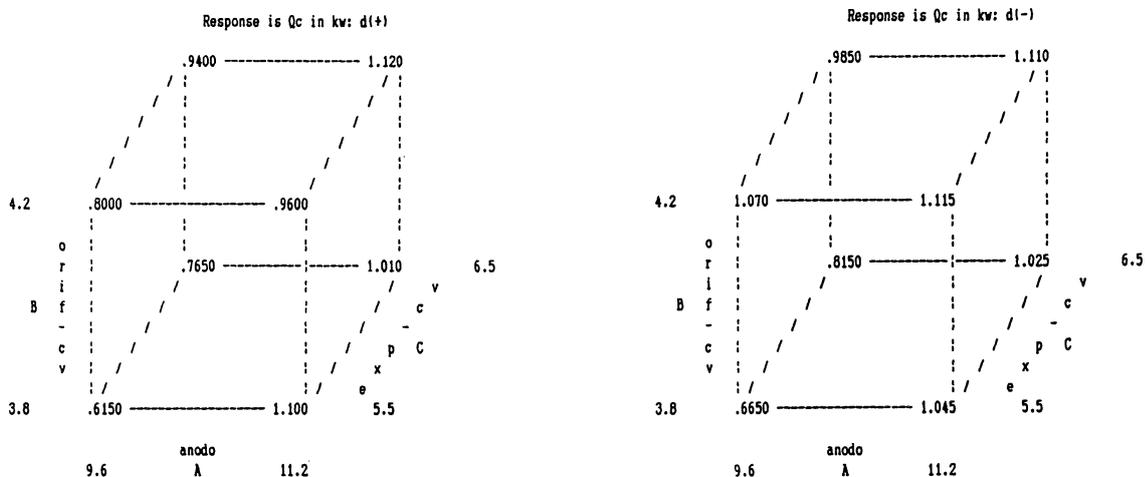


fig. 5.7-Representação gráfica dos valores medidos para Q_c , na tab. 3.1-a.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	0.794762	8	0.0993453	10.377	0.0001
ERROR	0.220187	23	0.0095734		
COR TOTAL	1.014950	31			
ROOT MSE	0.097844		R-SQUARED	0.7831	
DEP MEAN	0.943750		ADJ R-SQUARED	0.7076	
C. V.	10.37 %				
VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	0.943750	1		54.563	0.0001
A	0.117500	1	0.441800	6.793	0.0001
B	0.063125	1	0.127512	3.650	0.0013
AB	-0.048125	1	0.074112	-2.782	0.0106
C	0.028125	1	0.025312	1.626	0.1176
ABC	0.028750	1	0.026450	1.662	0.1100
D	-0.035625	1	0.040613	-2.060	0.0509
BD	-0.028750	1	0.026450	-1.662	0.1100
BCD	0.031875	1	0.032512	1.843	0.0783
Std ERROR	0.0172965				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

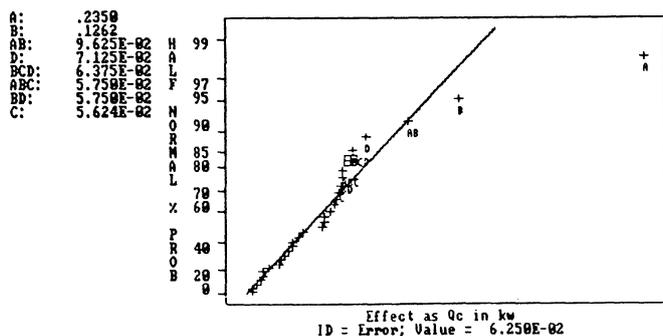


fig.5.8-Módulos dos efeitos sobre Q_c , versus a probabilidade de eles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK'S D	t VALUE	Run Ord
1	0.760000	0.633125	0.126875	1.5295	0.102	1.578	11
2	0.940000	1.021875	-0.081875	-0.9870	0.042	-0.986	22
3	0.990000	1.034375	-0.044375	-0.5350	0.012	-0.526	13
4	1.130000	1.115625	0.014375	0.1733	0.001	0.170	17
5	0.890000	0.810625	0.079375	0.9569	0.040	0.955	9
6	1.060000	1.084375	-0.024375	-0.2938	0.004	-0.288	1
7	0.960000	0.969375	-0.009375	-0.1130	0.001	-0.111	21
8	1.120000	1.165625	-0.045625	-0.5500	0.013	-0.542	32
9	0.530000	0.683125	-0.153125	-1.8460	0.148	-1.956	26
10	1.100000	1.071875	0.028125	0.3391	0.005	0.332	19
11	0.800000	0.841875	-0.041875	-0.5048	0.011	-0.496	25
12	1.120000	0.923125	0.196875	2.3734	0.245	2.671	10
13	0.720000	0.733125	-0.013125	-0.1582	0.001	-0.155	7
14	1.110000	1.006875	0.103125	1.2432	0.067	1.259	16
15	0.950000	0.904375	0.045625	0.5500	0.013	0.542	15
16	1.120000	1.100625	0.019375	0.2336	0.002	0.229	20
17	0.570000	0.633125	-0.063125	-0.7610	0.025	-0.754	31
18	1.150000	1.021875	0.128125	1.5446	0.104	1.596	2
19	1.150000	1.034375	0.115625	1.3939	0.084	1.425	28
20	1.100000	1.115625	-0.015625	-0.1884	0.002	-0.184	27
21	0.740000	0.810625	-0.070625	-0.8514	0.032	-0.846	23
22	0.990000	1.084375	-0.094375	-1.1377	0.056	-1.145	30
23	1.020000	0.969375	0.050625	0.6103	0.016	0.602	3
24	1.100000	1.165625	-0.065625	-0.7911	0.027	-0.784	6
25	0.700000	0.683125	0.016875	0.2034	0.002	0.199	18
26	1.110000	1.071875	0.038125	0.4596	0.009	0.452	8
27	0.700000	0.841875	-0.141875	-1.7103	0.127	-1.790	24
28	0.800000	0.923125	-0.123125	-1.4843	0.096	-1.527	14
29	0.810000	0.733125	0.076875	0.9268	0.037	0.924	12
30	0.910000	1.006875	-0.096875	-1.1679	0.059	-1.178	5
31	0.930000	0.904375	0.025625	0.3089	0.004	0.303	29
32	1.120000	1.100625	0.019375	0.2336	0.002	0.229	4

e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

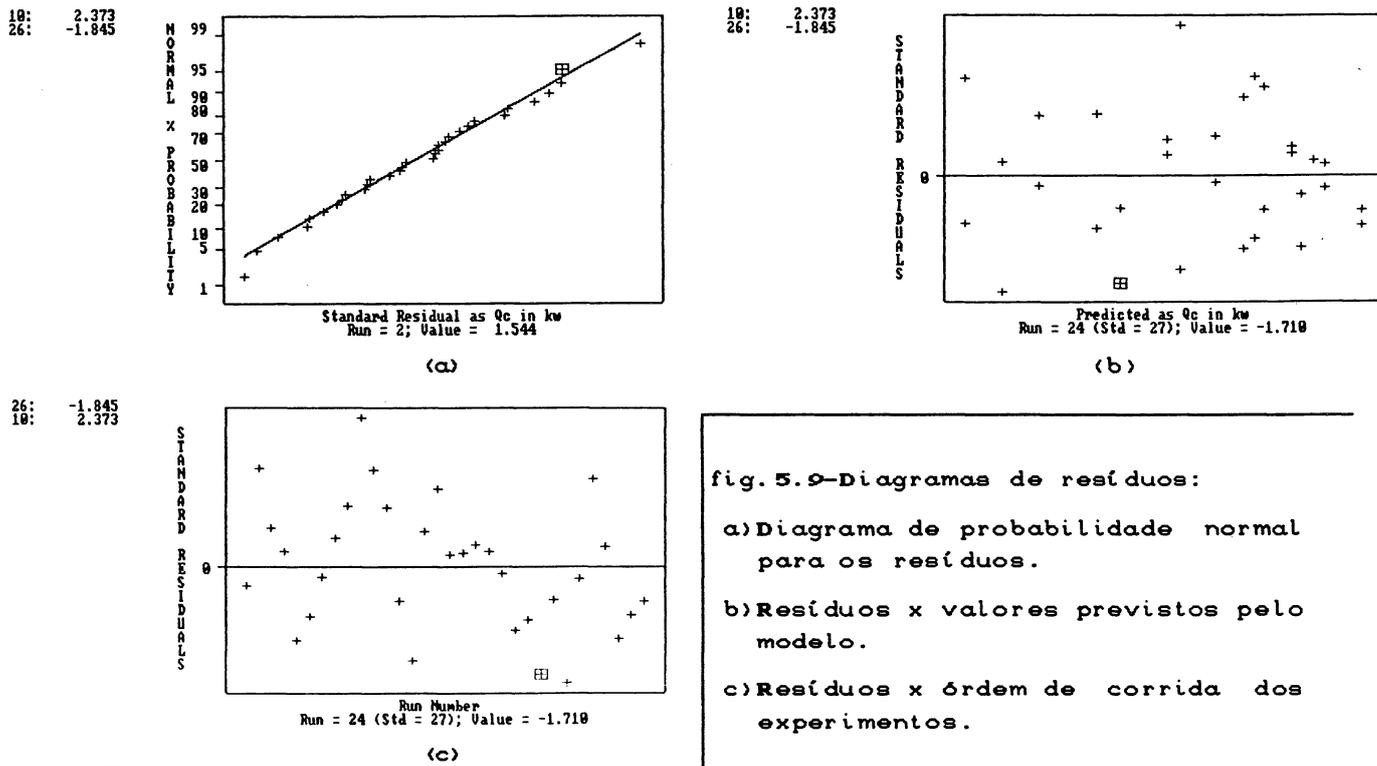


fig. 5.9-Diagramas de resíduos:
 a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
 b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
 c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

<p>MODELO UTILIZADO</p>	$\hat{y}_{ijkl} = 0.94 + (0.12)i + (0.06)j + (-0.05)ij + (0.03)k + (0.03)ijk + (-0.04)l + (-0.03)jl + (0.03)jkl$
<p>ADEQUAÇÃO DO MODELO</p>	<p>Nenhum "outlier" ou "padrão" foi observado nos diagramas de resíduos.</p>
<p>RESULTADOS DA ANOVA</p>	<p>Com alto nível de significância, são detectados os efeitos dos diâmetros do anodo e dos orifícios da câmara de vórtice (A, B) assim como da interação AB sobre a taxa de transferência de calor para o catodo, Q_c. Há, também, um forte indício da existência de efeito do diâmetro da câmara de vórtice, D, e da interação BCD. O modelo empregado na análise explica 78% da dispersão nas medidas de Q_c e possui um nível de significância de 99.99%.</p>

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE L

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

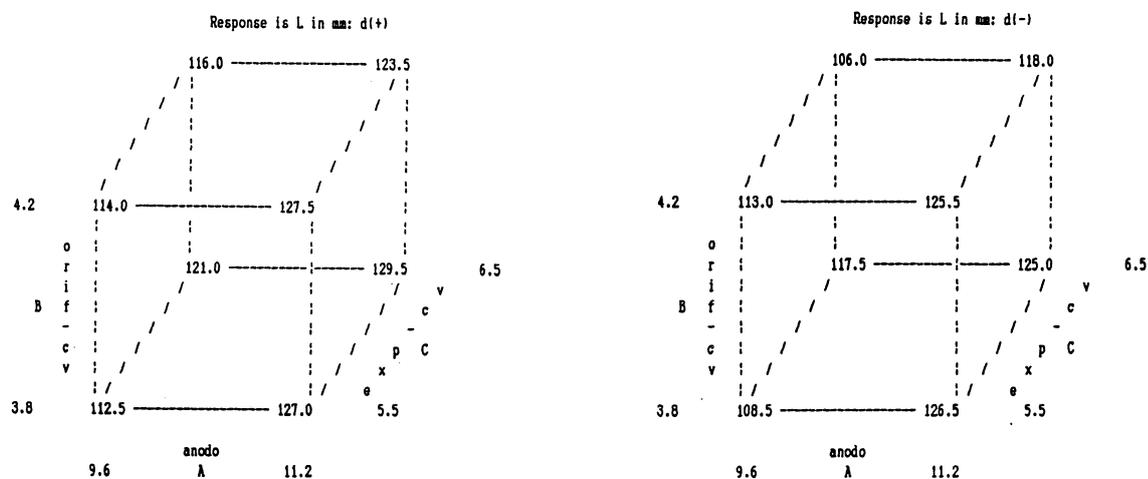


fig. 5. 10-Representação gráfica dos valores medidos para L, na tab. 3. 1-a.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	1449.750000	4	362.4375000	14.603	0.0001
ERROR	670.125000	27	24.8194444		
COR TOTAL	2119.875000	31			
ROOT MSE	4.981912		R-SQUARED	0.6839	
DEP MEAN	119.437500		ADJ R-SQUARED	0.6371	
C. V.	4.17 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	119.437500	1		135.619	0.0001
A	5.875000	1	1104.500000	6.671	0.0001
B	-1.500000	1	72.000000	-1.703	0.1000
BC	-2.187500	1	153.125000	-2.484	0.0195
D	1.937500	1	120.125000	2.200	0.0365
Std ERROR	0.8806859				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

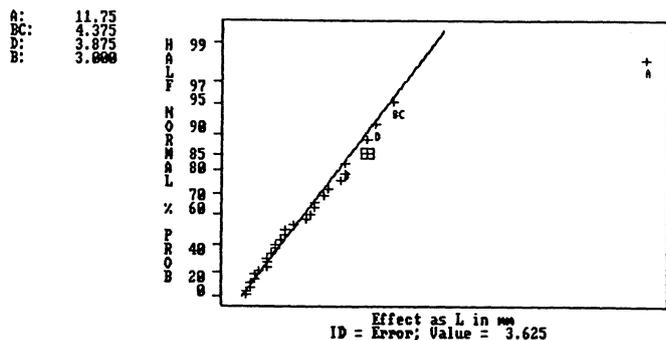
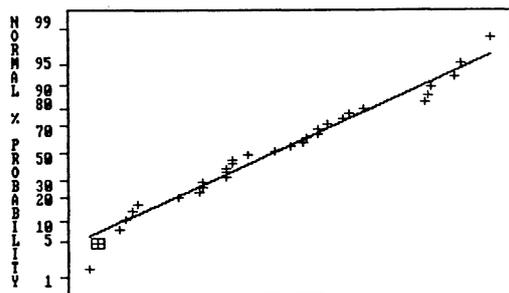


fig.5.11-Módulos dos efeitos sobre L, versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

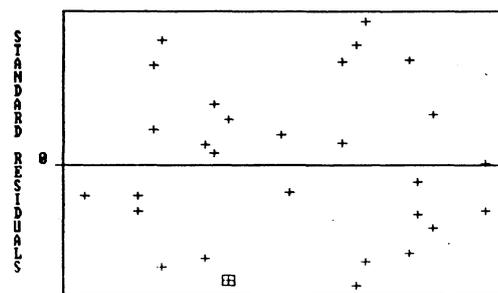
d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK'S D	t VALUE	Run Ord
1	109.000000	110.937500	-1.937500	-0.4234	0.007	-0.417	11
2	124.000000	122.687500	1.312500	0.2868	0.003	0.282	22
3	106.000000	112.312500	-6.312500	-1.3794	0.070	-1.404	13
4	118.000000	124.062500	-6.062500	-1.3248	0.065	-1.344	17
5	119.000000	115.312500	3.687500	0.8058	0.024	0.800	9
6	124.000000	127.062500	-3.062500	-0.6692	0.017	-0.662	1
7	106.000000	107.937500	-1.937500	-0.4234	0.007	-0.417	21
8	118.000000	119.687500	-1.687500	-0.3688	0.005	-0.363	32
9	116.000000	114.812500	1.187500	0.2595	0.002	0.255	26
10	121.000000	126.562500	-5.562500	-1.2155	0.055	-1.227	19
11	109.000000	116.187500	-7.187500	-1.5706	0.091	-1.617	25
12	131.000000	127.937500	3.062500	0.6692	0.017	0.662	10
13	121.000000	119.187500	1.812500	0.3961	0.006	0.390	7
14	131.000000	130.937500	0.062500	0.0137	0.000	0.013	16
15	118.000000	111.812500	6.187500	1.3521	0.068	1.374	15
16	116.000000	123.562500	-7.562500	-1.6526	0.101	-1.711	20
17	108.000000	110.937500	-2.937500	-0.6419	0.015	-0.635	31
18	129.000000	122.687500	6.312500	1.3794	0.070	1.404	2
19	120.000000	112.312500	7.687500	1.6799	0.105	1.742	28
20	133.000000	124.062500	8.937500	1.9530	0.141	2.068	27
21	116.000000	115.312500	0.687500	0.1502	0.001	0.147	23
22	126.000000	127.062500	-1.062500	-0.2322	0.002	-0.228	30
23	106.000000	107.937500	-1.937500	-0.4234	0.007	-0.417	3
24	118.000000	119.687500	-1.687500	-0.3688	0.005	-0.363	6
25	109.000000	114.812500	-5.812500	-1.2702	0.060	-1.285	18
26	133.000000	126.562500	6.437500	1.4067	0.073	1.434	8
27	119.000000	116.187500	2.812500	0.6146	0.014	0.607	24
28	124.000000	127.937500	-3.937500	-0.8604	0.027	-0.856	14
29	121.000000	119.187500	1.812500	0.3961	0.006	0.390	12
30	128.000000	130.937500	-2.937500	-0.6419	0.015	-0.635	5
31	114.000000	111.812500	2.187500	0.4780	0.008	0.471	29
32	131.000000	123.562500	7.437500	1.6253	0.098	1.679	4

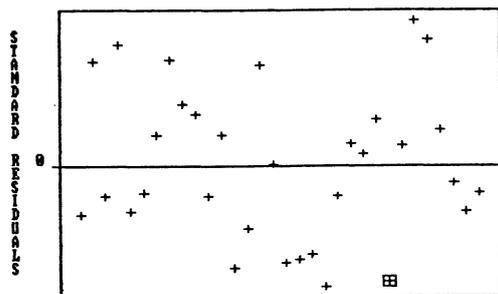
e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

27: 1.953
28: -1.652Standard Residual as L in mm
Run = 25; Value = -1.570

(a)

27: 1.953
28: -1.652Predicted as L in mm
Run = 25 (Std = 11); Value = -1.570

(b)

27: 1.953
28: -1.652Run Number
Run = 25 (Std = 11); Value = -1.570

(c)

fig. 5.12-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 119.4 + (5.9)i + (-1.5)j + (-2.2)jk + (1.9)l$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	Nenhuma tendência foi observada nos diagramas. Também não ocorreram "outliers". O modelo parece perfeitamente adequado.
RESULTADOS DA ANOVA	Pode-se assumir, com tranquilidade, a relevância do diâmetro do anodo e a do diâmetro dos orifícios de injeção em conjunto com a espessura da câmara de vórtice na definição do comprimento médio do arco. Há, também, forte indicação de que o diâmetro da câmara de vórtice afeta L.

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE L_v

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

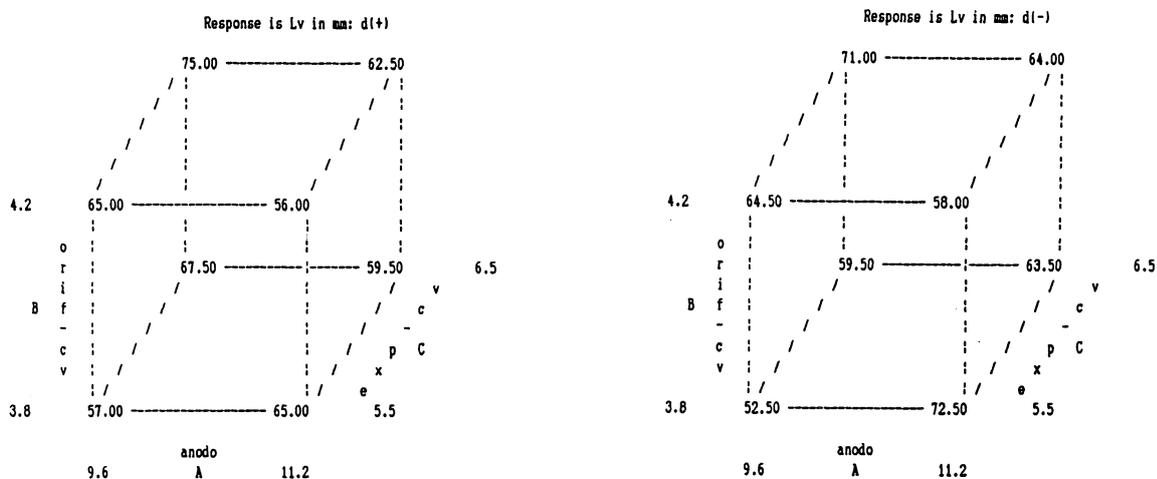


fig. 5.13-Representação gráfica dos valores medidos para L_v , na tab. 3.1-a.

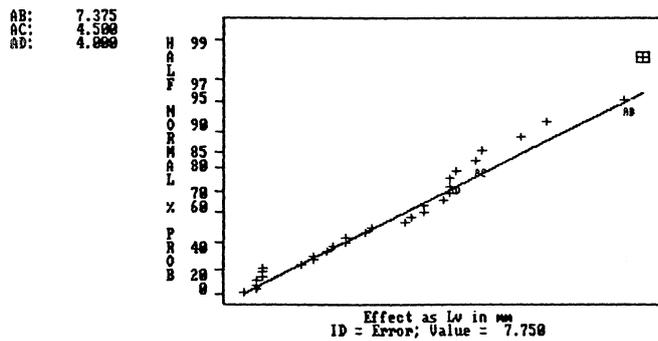
b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	725.125000	3	241.7083333	2.969	0.0489
ERROR	2279.750000	28	81.4196429		
COR TOTAL	3004.875000	31			
ROOT MSE	9.023283		R-SQUARED	0.2413	
DEP MEAN	63.312500		ADJ R-SQUARED	0.1600	
C. V.	14.25 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	63.312500	1		39.692	0.0001
AB	-3.687500	1	435.125000	-2.312	0.0284
AC	-2.250000	1	162.000000	-1.411	0.1694
AD	-2.000000	1	128.000000	-1.254	0.2203
Std ERROR	1.5951062				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

fig.5.14-Módulos dos efeitos sobre L_V , versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK's D	t VALUE	Run Ord
1	55.00000	55.37500	-0.37500	-0.0444	0.000	-0.044	11
2	65.00000	71.25000	-6.25000	-0.7405	0.020	-0.734	22
3	65.00000	62.75000	2.25000	0.2666	0.003	0.262	13
4	70.00000	63.87500	6.12500	0.7257	0.019	0.719	17
5	55.00000	59.87500	-4.87500	-0.5776	0.012	-0.571	9
6	65.00000	66.75000	-1.75000	-0.2073	0.002	-0.204	1
7	72.00000	67.25000	4.75000	0.5628	0.011	0.556	21
8	68.00000	59.37500	8.62500	1.0219	0.037	1.023	32
9	40.00000	59.37500	-19.37500	-2.2955	0.188	-2.502	26
10	80.00000	67.25000	12.75000	1.5106	0.081	1.548	19
11	60.00000	66.75000	-6.75000	-0.7997	0.023	-0.794	25
12	50.00000	59.87500	-9.87500	-1.1700	0.049	-1.178	10
13	60.00000	63.87500	-3.87500	-0.4591	0.008	-0.453	7
14	55.00000	62.75000	-7.75000	-0.9182	0.030	-0.916	16
15	80.00000	71.25000	8.75000	1.0367	0.038	1.038	15
16	60.00000	55.37500	4.62500	0.5480	0.011	0.541	20
17	50.00000	55.37500	-5.37500	-0.6368	0.014	-0.630	31
18	80.00000	71.25000	8.75000	1.0367	0.038	1.038	2
19	64.00000	62.75000	1.25000	0.1481	0.001	0.145	28
20	46.00000	63.87500	-17.87500	-2.1178	0.160	-2.269	27
21	64.00000	59.87500	4.12500	0.4887	0.009	0.482	23
22	62.00000	66.75000	-4.75000	-0.5628	0.011	-0.556	30
23	70.00000	67.25000	2.75000	0.3258	0.004	0.321	3
24	60.00000	59.37500	0.62500	0.0740	0.000	0.073	6
25	74.00000	59.37500	14.62500	1.7327	0.107	1.801	18
26	50.00000	67.25000	-17.25000	-2.0437	0.149	-2.176	8
27	70.00000	66.75000	3.25000	0.3850	0.005	0.379	24
28	62.00000	59.87500	2.12500	0.2518	0.002	0.248	14
29	75.00000	63.87500	11.12500	1.3180	0.062	1.336	12
30	64.00000	62.75000	1.25000	0.1481	0.001	0.145	5
31	70.00000	71.25000	-1.25000	-0.1481	0.001	-0.145	29
32	65.00000	55.37500	9.62500	1.1403	0.046	1.147	4

e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

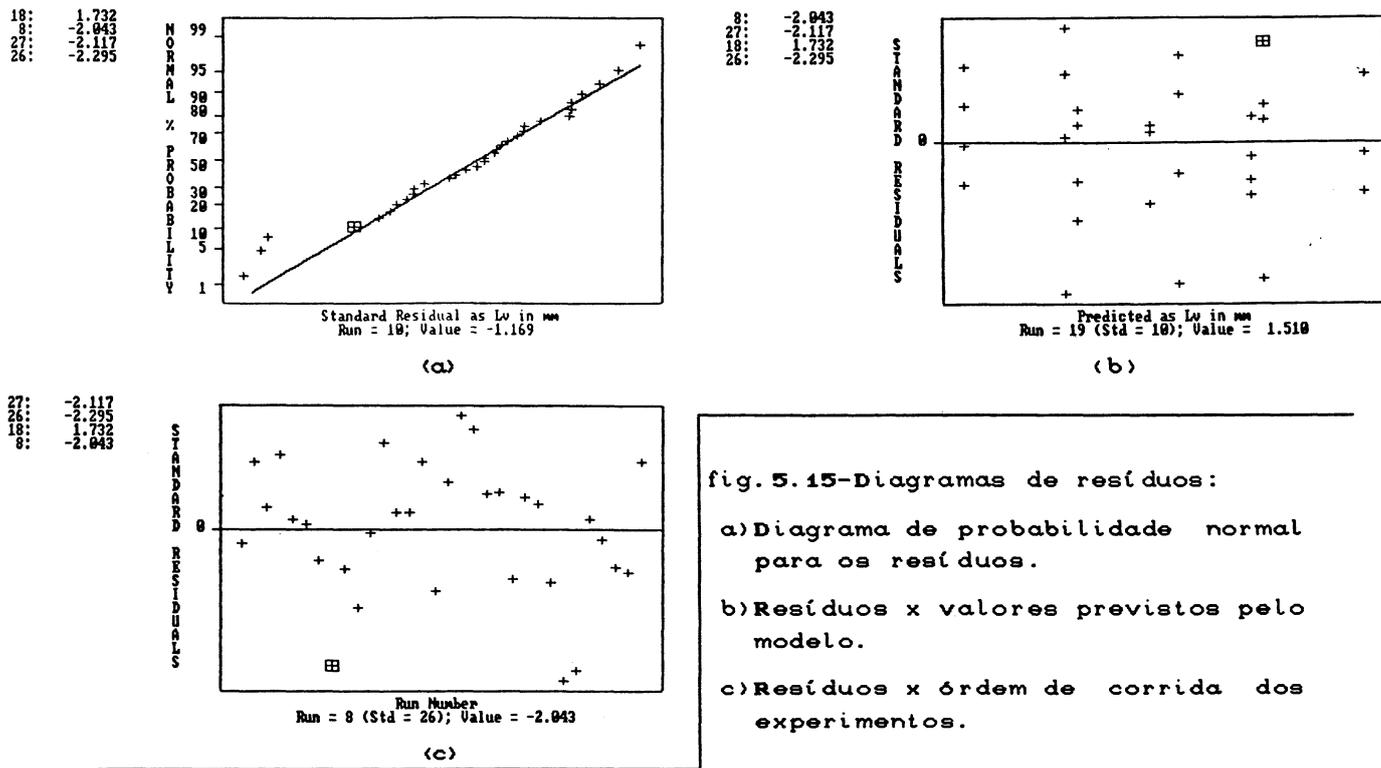


fig. 5.15-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 63 + (-4)ij + (-2)ik + (-2)il$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	Os diagramas dos resíduos não revelam nenhuma ameaça sobre a validade das hipóteses utilizadas na análise.
RESULTADOS DA ANOVA	O modelo utilizado na análise é extremamente pobre: explica só 24% da dispersão total nas medidas e tem um nível de significância de apenas 95%. Este resultado aponta para a possibilidade de todas as variações observadas nas medidas terem ocorrido por puro acaso. Se há algum efeito sobre L_v , ele está escondido pela dispersão errática das v medidas. O indicativo da ANOVA para a relevância da interação AB sobre L_v fica enfraquecido pela baixa significância do modelo empregado.

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE D_c

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

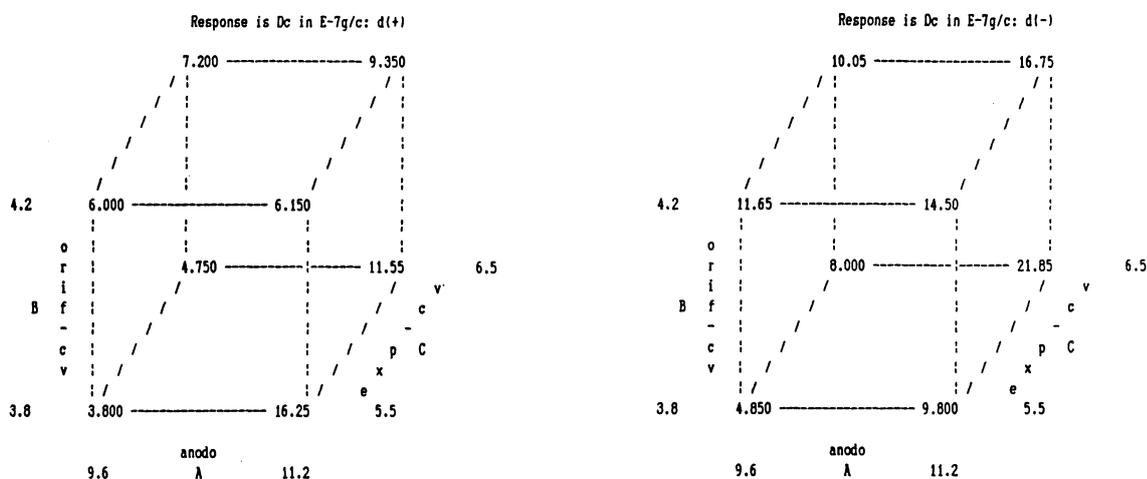


fig. 5.16-Representação gráfica dos valores medidos para D_c , na tab. 3.1-a.

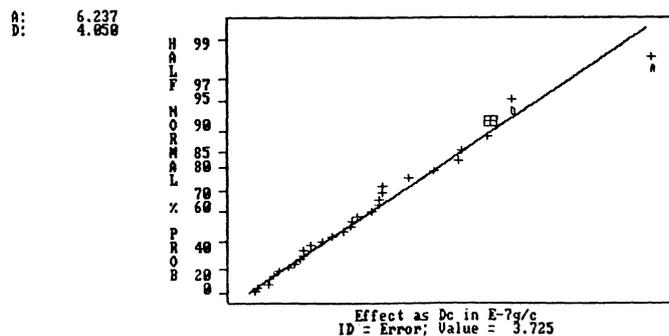
b) ANÁLISE DE VARIANCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	442.471250	2	221.2356250	8.001	0.0017
ERROR	801.867500	29	27.6506034		
COR TOTAL	1244.338750	31			
ROOT MSE	5.258384		R-SQUARED	0.3556	
DEP MEAN	10.156250		ADJ R-SQUARED	0.3111	
C. V.	51.77 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	10.156250	1		10.926	0.0001
A	3.118750	1	311.251250	3.355	0.0022
D	-2.025000	1	131.220000	-2.178	0.0376
Std ERROR	0.9295598				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

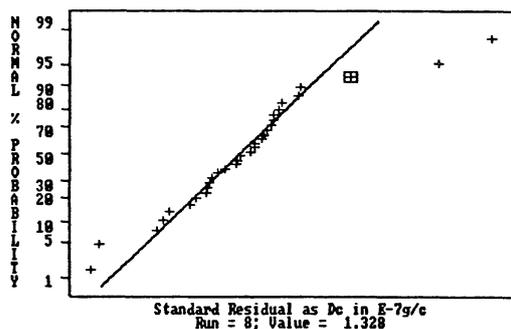
fig.5.17-Módulos dos efeitos sobre D_c , versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK'S D	t VALUE	Run Ord
1	5.500000	9.062500	-3.562500	-0.7117	0.017	-0.705	11
2	10.000000	15.300000	-5.300000	-1.0588	0.039	-1.061	22
3	10.800000	9.062500	1.737500	0.3471	0.004	0.342	13
4	15.900000	15.300000	0.600000	0.1199	0.000	0.118	17
5	10.100000	9.062500	1.037500	0.2073	0.001	0.204	9
6	30.900000	15.300000	15.600000	3.1164	0.335	3.755	1
7	10.700000	9.062500	1.637500	0.3271	0.004	0.322	21
8	6.000000	15.300000	-9.300000	-1.8578	0.119	-1.945	32
9	3.200000	5.012500	-1.812500	-0.3621	0.005	-0.357	26
10	14.600000	11.250000	3.350000	0.6692	0.015	0.663	19
11	5.600000	5.012500	0.587500	0.1174	0.000	0.115	25
12	10.900000	11.250000	-0.350000	-0.0699	0.000	-0.069	10
13	2.700000	5.012500	-2.312500	-0.4620	0.007	-0.456	7
14	12.400000	11.250000	1.150000	0.2297	0.002	0.226	16
15	7.100000	5.012500	2.087500	0.4170	0.006	0.411	15
16	9.900000	11.250000	-1.350000	-0.2697	0.003	-0.265	20
17	4.200000	9.062500	-4.862500	-0.9714	0.033	-0.970	31
18	9.600000	15.300000	-5.700000	-1.1387	0.045	-1.145	2
19	12.500000	9.062500	3.437500	0.6867	0.016	0.680	28
20	13.100000	15.300000	-2.200000	-0.4395	0.007	-0.433	27
21	5.900000	9.062500	-3.162500	-0.6318	0.014	-0.625	23
22	12.800000	15.300000	-2.500000	-0.4994	0.009	-0.493	30
23	9.400000	9.062500	0.337500	0.0674	0.000	0.066	3
24	27.500000	15.300000	12.200000	2.4372	0.205	2.686	6
25	4.400000	5.012500	-0.612500	-0.1224	0.001	-0.120	18
26	17.900000	11.250000	6.650000	1.3285	0.061	1.347	8
27	6.400000	5.012500	1.387500	0.2772	0.003	0.273	24
28	1.400000	11.250000	-9.850000	-1.9677	0.134	-2.077	14
29	6.800000	5.012500	1.787500	0.3571	0.004	0.352	12
30	10.700000	11.250000	-0.550000	-0.1099	0.000	-0.108	5
31	7.300000	5.012500	2.287500	0.4570	0.007	0.451	29
32	8.800000	11.250000	-2.450000	-0.4894	0.008	-0.483	4

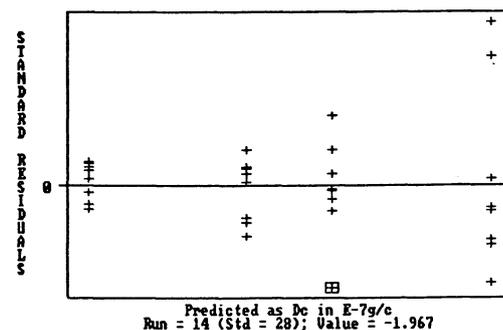
e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

1: 3.116
6: 2.437
32: -1.857
14: -1.967



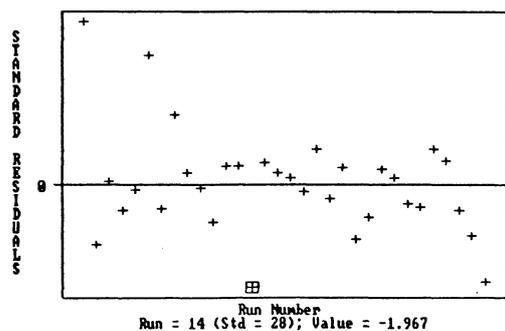
(a)

6: 2.437
32: -1.857
1: 3.116



(b)

6: 2.437
1: 3.116



(c)

fig. 5.18-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 10.2 + (3.1)i + (-2.0)l$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	Exceto pela ocorrência dos grandes desvios associados às corridas 1 e 6, não se observou outros problemas nos diagramas dos resíduos. Estes desvios podem estar associados ao tipo de encaixe utilizado para o catodo.
RESULTADOS DA ANOVA	Assume-se que o desgaste do catodo, D_c , é alterado por mudanças no diâmetro do anodo. Há indício de que o diâmetro da câmara de vórtice também possa afetar a taxa de desgaste, D_c . Uma importante fonte de variação em D_c não foi controlada nos experimentos, pois, na ANOVA, vê-se que as variações randômicas (ROOT MSE) são da ordem do valor médio observado para D_c . O fato de o modelo ajustado explicar só 35% do espalhamento total das medidas e a presença dos grandes resíduos relativos às corridas 1 e 6 somam crédito a esta afirmação. É possível que outros efeitos importantes tenham sido escondidos pela grande dispersão nas medidas de D_c .

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE H

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

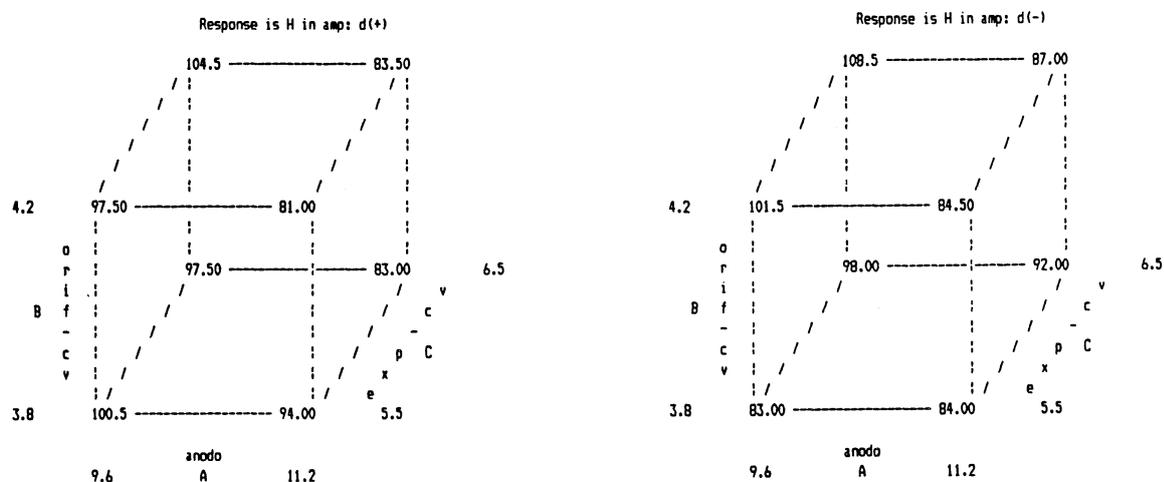


fig. 5.19-Representação gráfica dos valores medidos para H, na tab. 3.1-b.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	2189.375000	6	364.8958333	9.596	0.0001
ERROR	950.625000	25	38.0250000		
COR TOTAL	3140.000000	31			
ROOT MSE	6.166441		R-SQUARED	0.6973	
DEP MEAN	92.500000		ADJ R-SQUARED	0.6246	
C. V.	6.67 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR HO PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	92.500000	1		84.856	0.0001
A	-6.375000	1	1300.500000	-5.848	0.0001
AB	-3.125000	1	312.500000	-2.867	0.0083
C	1.750000	1	98.000000	1.605	0.1210
BD	-2.062500	1	136.125000	-1.892	0.0701
CD	-2.312500	1	171.125000	-2.121	0.0440
BCD	2.312500	1	171.125000	2.121	0.0440
Std ERROR	1.0900831				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

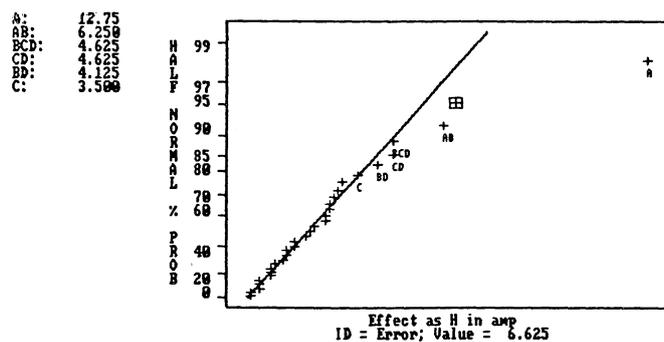


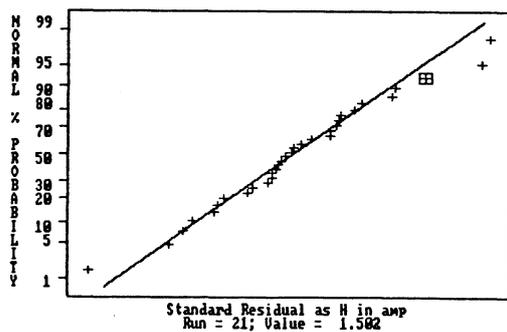
fig.5.20-Módulos dos efeitos sobre H, versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK's D	t VALUE	Run Ord
1	80.000000	87.312500	-7.312500	-1.3416	0.072	-1.365	11
2	85.000000	80.812500	4.187500	0.7683	0.024	0.762	22
3	97.000000	102.312500	-5.312500	-0.9747	0.038	-0.974	13
4	86.000000	83.312500	2.687500	0.4931	0.010	0.485	17
5	101.000000	100.062500	0.937500	0.1720	0.001	0.169	9
6	92.000000	93.562500	-1.562500	-0.2867	0.003	-0.281	1
7	114.000000	105.812500	8.187500	1.5022	0.090	1.543	21
8	85.000000	86.812500	-1.812500	-0.3325	0.004	-0.327	32
9	101.000000	100.687500	0.312500	0.0573	0.000	0.056	26
10	91.000000	94.187500	-3.187500	-0.5848	0.014	-0.577	19
11	98.000000	98.187500	-0.187500	-0.0344	0.000	-0.034	25
12	91.000000	79.187500	11.812500	2.1673	0.188	2.356	10
13	101.000000	94.937500	6.062500	1.1123	0.049	1.118	7
14	75.000000	88.437500	-13.437500	-2.4654	0.243	-2.777	16
15	114.000000	101.687500	12.312500	2.2590	0.204	2.481	15
16	78.000000	82.687500	-4.687500	-0.8600	0.030	-0.855	20
17	86.000000	87.312500	-1.312500	-0.2408	0.002	-0.236	31
18	83.000000	80.812500	2.187500	0.4013	0.006	0.395	2
19	106.000000	102.312500	3.687500	0.6766	0.018	0.669	28
20	83.000000	83.312500	-0.312500	-0.0573	0.000	-0.056	27
21	95.000000	100.062500	-5.062500	-0.9288	0.035	-0.926	23
22	92.000000	93.562500	-1.562500	-0.2867	0.003	-0.281	30
23	103.000000	105.812500	-2.812500	-0.5160	0.011	-0.508	3
24	89.000000	86.812500	2.187500	0.4013	0.006	0.395	6
25	100.000000	100.687500	-0.687500	-0.1261	0.001	-0.124	18
26	97.000000	94.187500	2.812500	0.5160	0.011	0.508	8
27	97.000000	98.187500	-1.187500	-0.2179	0.002	-0.214	24
28	71.000000	79.187500	-8.187500	-1.5022	0.090	-1.543	14
29	94.000000	94.937500	-0.937500	-0.1720	0.001	-0.169	12
30	91.000000	88.437500	2.562500	0.4701	0.009	0.463	5
31	95.000000	101.687500	-6.687500	-1.2270	0.060	-1.240	29
32	89.000000	82.687500	6.312500	1.1582	0.054	1.166	4

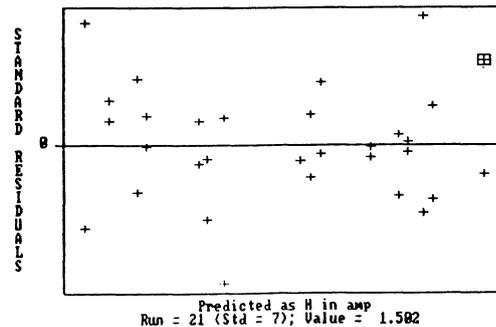
e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

15: 2.259
16: -2.167
16: -2.465



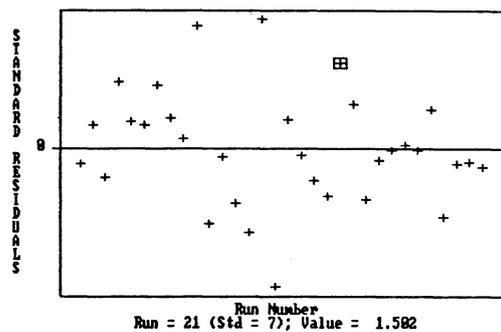
(a)

15: 2.259
16: -2.465
16: 2.167



(b)

16: -2.465
15: 2.259
16: 2.167



(c)

fig. 5.21-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 92 + (-6)i + (-3)ij + (2)k + (-2)jl + (-2)kl + (2)jkl$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	Nada que possa ameaçar a validade das hipóteses subjacentes à análise é observado nos diagramas.
RESULTADOS DA ANOVA	Pode-se assumir que as mudanças no diâmetro do anodo e no diâmetro dos orifícios da câmara de vórtice interagem na produção de efeitos sobre a altura total média das oscilações na corrente elétrica através da tocha. Os efeitos BD, CD e BCD também têm boa margem estatística.

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE D

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

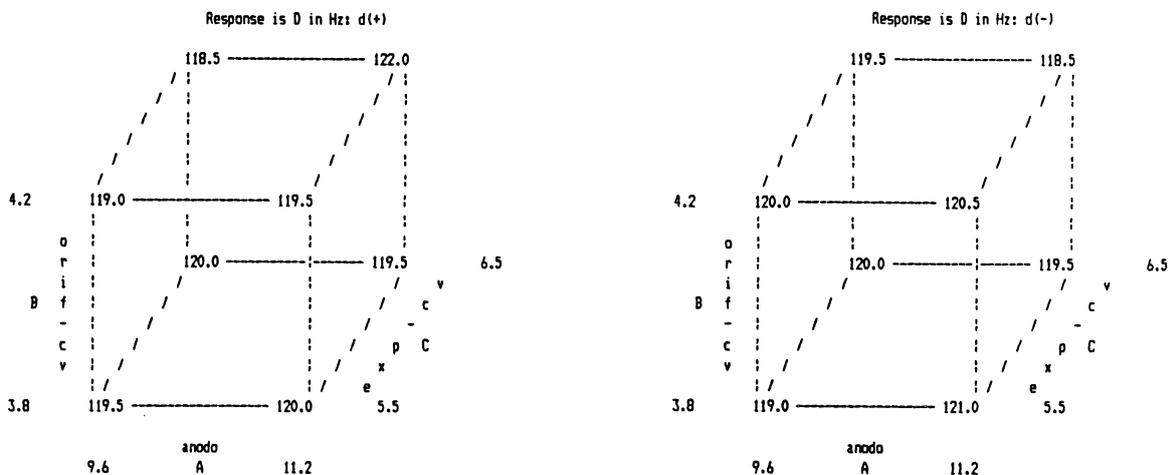


fig. 5.22-Representação gráfica dos valores medidos para D, na tab. 3.1-b.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	24.000000	15	1.6000000	0.356	0.9741
ERROR	72.000000	16	4.5000000		
COR TOTAL	96.000000	31			
ROOT MSE	2.121320		R-SQUARED	0.2500	
DEP MEAN	119.750000		ADJ R-SQUARED	-0.4531	
C. V.	1.77 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	119.750000	1		319.333	0.0001
A	0.312500	1	3.125000	0.833	0.4169
B	-0.062500	1	0.125000	-0.167	0.8697
AB	0.125000	1	0.500000	0.333	0.7432
C	-0.062500	1	0.125000	-0.167	0.8697
AC	-0.125000	1	0.500000	-0.333	0.7432
BC	0.000000	1	0.000000	0.000	1.0000
ABC	0.312500	1	3.125000	0.833	0.4169
D	-0.000000	1	0.000000	-0.000	1.0000
AD	0.187500	1	1.125000	0.500	0.6239
BD	0.062500	1	0.125000	0.167	0.8697
ABD	0.375000	1	4.500000	1.000	0.3322
CD	0.312500	1	3.125000	0.833	0.4169
ACD	0.375000	1	4.500000	1.000	0.3322
BCD	0.250000	1	2.000000	0.667	0.5145
ABCD	0.187500	1	1.125000	0.500	0.6239
Std ERROR	0.3750000				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

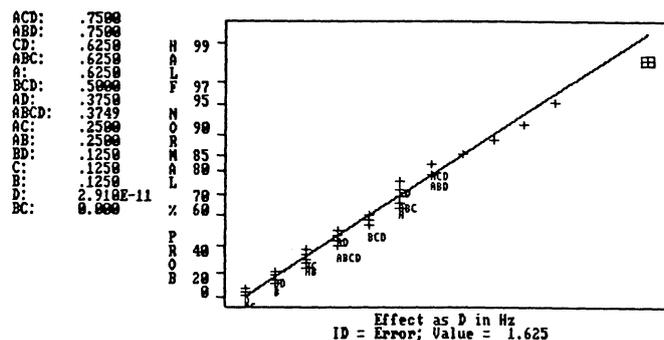


fig.5.23-Módulos dos efeitos sobre D, versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK's D	t VALUE	Run Ord
1	120.000000	119.000000	1.000000	0.6667	0.028	0.655	11
2	125.000000	121.000000	4.000000	2.6667	0.444	3.464	22
3	120.000000	120.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	13
4	123.000000	120.500000	2.500000	1.6667	0.174	1.775	17
5	120.000000	120.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	9
6	120.000000	119.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	1
7	120.000000	119.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	21
8	119.000000	118.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	32
9	120.000000	119.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	26
10	119.000000	120.000000	-1.000000	-0.6667	0.028	-0.655	19
11	119.000000	119.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	25
12	120.000000	119.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	10
13	121.000000	120.000000	1.000000	0.6667	0.028	0.655	7
14	120.000000	119.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	16
15	118.000000	118.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	15
16	125.000000	122.000000	3.000000	2.0000	0.250	2.236	20
17	118.000000	119.000000	-1.000000	-0.6667	0.028	-0.655	31
18	117.000000	121.000000	-4.000000	-2.6667	0.444	-3.464	2
19	120.000000	120.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	28
20	118.000000	120.500000	-2.500000	-1.6667	0.174	-1.775	27
21	120.000000	120.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	23
22	119.000000	119.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	30
23	119.000000	119.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	3
24	118.000000	118.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	6
25	119.000000	119.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	18
26	121.000000	120.000000	1.000000	0.6667	0.028	0.655	8
27	119.000000	119.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	24
28	119.000000	119.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	14
29	119.000000	120.000000	-1.000000	-0.6667	0.028	-0.655	12
30	119.000000	119.500000	-0.500000	-0.3333	0.007	-0.324	5
31	119.000000	118.500000	0.500000	0.3333	0.007	0.324	29
32	119.000000	122.000000	-3.000000	-2.0000	0.250	-2.236	4

e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

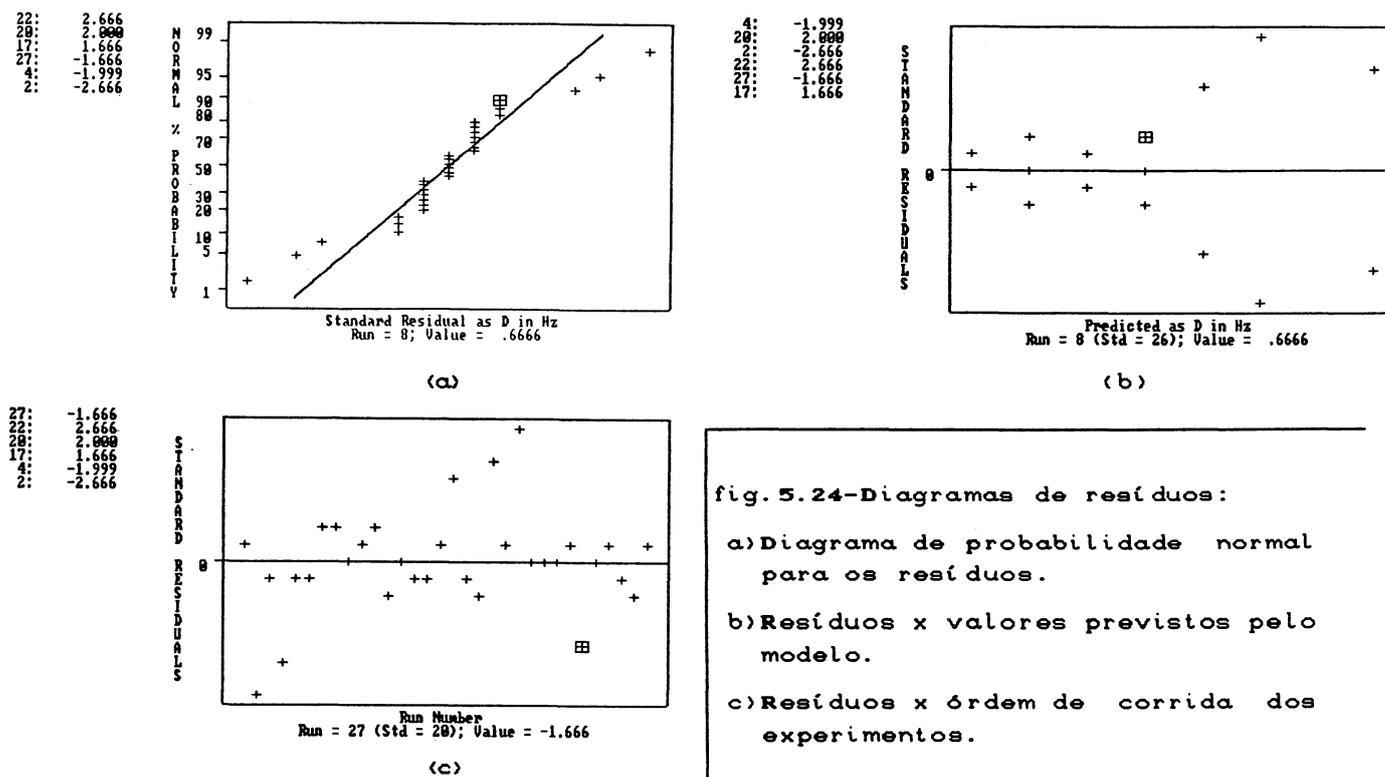


fig. 5.24-Diagramas de resíduos:

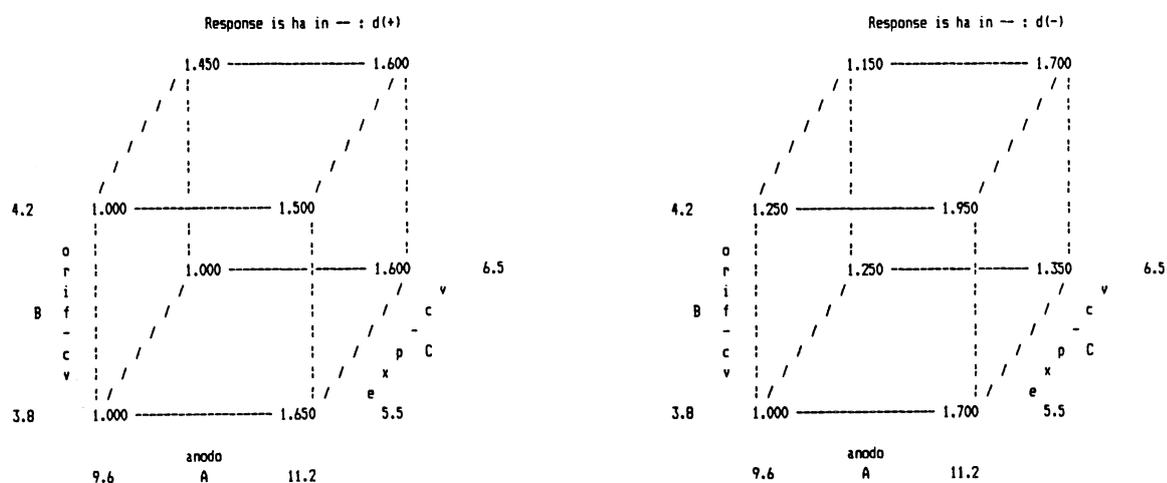
- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 119.8 + (0.3)i + (-0.1)j + (0.1)ij + (-0.1)k + (-0.1)ik + (0.0)jk + (0.3)ijk + (0.0)l + (0.2)il + (0.1)jl + (0.4)ijl + (0.3)kl + (0.4)ikl + (0.3)jkl + (0.2)ijkl$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	As várias repetições de resíduos idênticos e a presença de seis valores relativamente grandes (corridas 2, 4, 17, 20, 22 e 27) evidencia que a distribuição desses resíduos não é normal. Não foi possível normalizá-los através de transações de escala.
RESULTADOS DA ANOVA	Ainda que conclusões seguras não possam ser tiradas da ANOVA, no "Diagrama-Metade de Probabilidade Normal" vê-se que os efeitos dos "tratamentos" confundem-se completamente com as variações erráticas nos ensaios repetidos. Então, assume-se que as mudanças efetuadas na geometria da câmara de descarga não afetam a densidade, D, de picos das oscilações na corrente elétrica.

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE h_a

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

fig. 5.25-Representação gráfica dos valores medidos para h_a , na tab. 3.1-b.

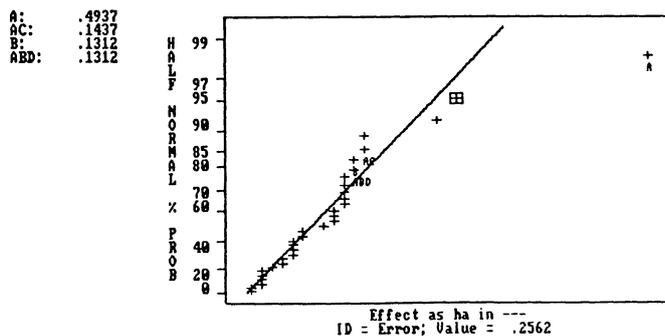
b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	2.391250	4	0.5978125	7.171	0.0005
ERROR	2.250937	27	0.0833681		
COR TOTAL	4.642187	31			
ROOT MSE	0.288735		R-SQUARED	0.5151	
DEP MEAN	1.384375		ADJ R-SQUARED	0.4433	
C. V.	20.86 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR H0 PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	1.384375	1		27.122	0.0001
A	0.246875	1	1.950312	4.837	0.0001
B	0.065625	1	0.137813	1.286	0.2095
AC	-0.071875	1	0.165312	-1.408	0.1705
ABD	-0.065625	1	0.137812	-1.286	0.2095
Std ERROR	0.0510417				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

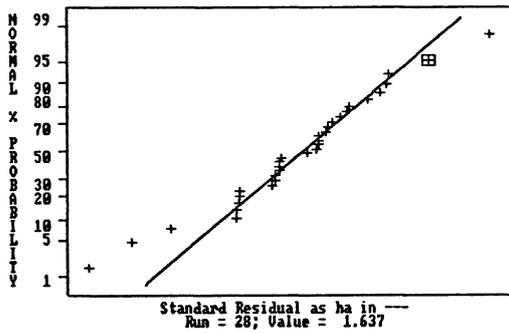
fig.5.26-Módulos dos efeitos sobre h_a , versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK's D	t VALUE	Run Ord
1	1.00000	1.065625	-0.065625	-0.2474	0.002	-0.243	11
2	1.60000	1.571875	0.028125	0.1060	0.000	0.104	22
3	1.00000	1.065625	-0.065625	-0.2474	0.002	-0.243	13
4	1.90000	1.834375	0.065625	0.2474	0.002	0.243	17
5	1.50000	1.209375	0.290625	1.0958	0.044	1.100	9
6	1.00000	1.428125	-0.428125	-1.6142	0.097	-1.667	1
7	1.30000	1.209375	0.090625	0.3417	0.004	0.336	21
8	1.60000	1.690625	-0.090625	-0.3417	0.004	-0.336	32
9	1.00000	0.934375	0.065625	0.2474	0.002	0.243	26
10	1.80000	1.703125	0.096875	0.3653	0.005	0.359	19
11	1.00000	1.196875	-0.196875	-0.7423	0.020	-0.736	25
12	2.00000	1.703125	0.296875	1.1194	0.046	1.125	10
13	1.00000	1.078125	-0.078125	-0.2946	0.003	-0.290	7
14	2.20000	1.559375	0.640625	2.4154	0.216	2.677	16
15	1.50000	1.340625	0.159375	0.6009	0.013	0.594	15
16	1.70000	1.559375	0.140625	0.5302	0.010	0.523	20
17	1.00000	1.065625	-0.065625	-0.2474	0.002	-0.243	31
18	1.80000	1.571875	0.228125	0.8601	0.027	0.856	2
19	1.50000	1.065625	0.434375	1.6378	0.099	1.693	28
20	2.00000	1.834375	0.165625	0.6245	0.014	0.617	27
21	1.00000	1.209375	-0.209375	-0.7894	0.023	-0.784	23
22	1.70000	1.428125	0.271875	1.0251	0.039	1.026	30
23	1.00000	1.209375	-0.209375	-0.7894	0.023	-0.784	3
24	1.80000	1.690625	0.109375	0.4124	0.006	0.406	6
25	1.00000	0.934375	0.065625	0.2474	0.002	0.243	18
26	1.50000	1.703125	-0.203125	-0.7659	0.022	-0.760	8
27	1.00000	1.196875	-0.196875	-0.7423	0.020	-0.736	24
28	1.00000	1.703125	-0.703125	-2.6511	0.260	-3.025	14
29	1.00000	1.078125	-0.078125	-0.2946	0.003	-0.290	12
30	1.00000	1.559375	-0.559375	-2.1091	0.165	-2.265	5
31	1.40000	1.340625	0.059375	0.2239	0.002	0.220	29
32	1.50000	1.559375	-0.059375	-0.2239	0.002	-0.220	4

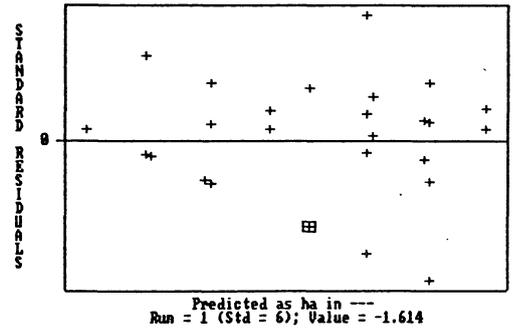
e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

16: 2.415
 1: -1.614
 5: -2.189
 14: -2.651



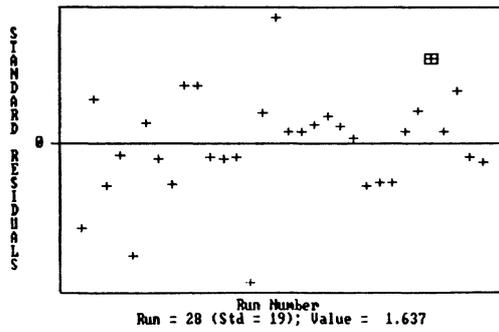
(a)

14: -2.651
 5: -2.189
 16: 2.415
 1: -1.614



(b)

16: 2.415
 14: -2.651
 5: -2.189
 1: -1.614



(c)

fig. 5.27-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

<p>MODELO UTILIZADO</p>	$\hat{y}_{ijkl} = 1.38 + (0.25)i + (0.07)j + (-0.07)ik + (-0.07)ijl$
<p>ADEQUAÇÃO DO MODELO</p>	<p>No diagrama dos "resíduos x valores previstos", há uma pequena tendência dos resíduos serem positivos para pequenos valores de h_a. Isso ocorre porque h_a, por definição, não pode ser menor que 1. A tendência não deve causar preocupação, pois, quando se está empregando o modelo de efeitos fixos balanceado, o teste F (interpretado nas ANOVAS como um teste t-de students), é robusto relativamente à ocorrência de "padrões" no referido diagrama (ref. 8, pag. 91).</p>
<p>RESULTADOS DA ANOVA</p>	<p>Apenas a mudança no diâmetro do anodo teve efeito sobre a altura total média relativa, h_a, dos picos anômalos.</p>

ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE d_a

a) REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIDAS

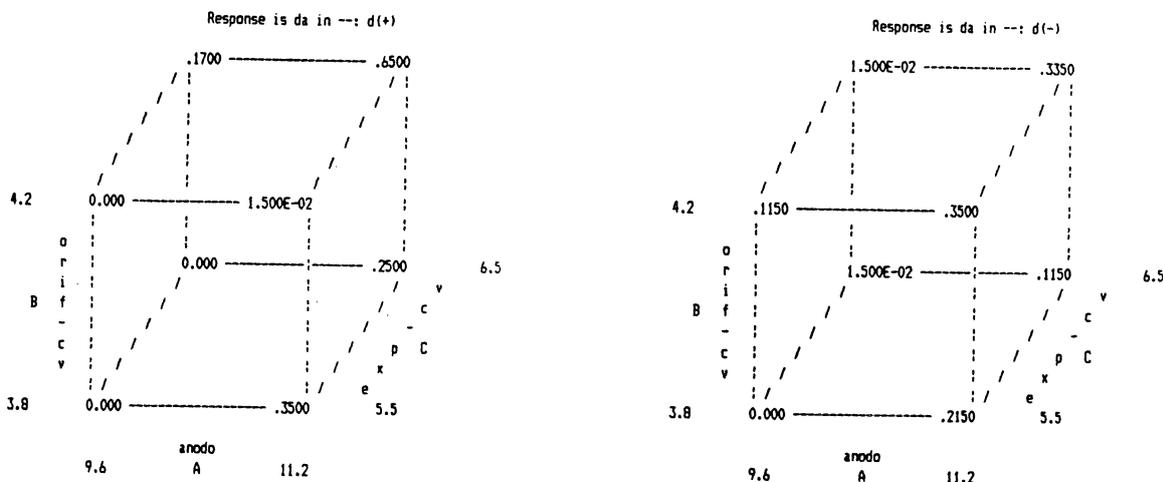


fig. 5.28-Representação gráfica dos valores medidos para d_a , na tab. 3.1-b.

b) ANÁLISE DE VARIÂNCIA

ANOVA for Selected Model

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F VALUE	PROB > F
MODEL	1.047197	15	0.0698131	2.678	0.0297
ERROR	0.417150	16	0.0260719		
CCR TOTAL	1.464347	31			
ROOT MSE	0.161468		R-SQUARED	0.7151	
DEP MEAN	0.162187		ADJ R-SQUARED	0.4481	
C. V.	99.56 %				

VARIABLE	PARAMETER ESTIMATE	DF	SUM OF SQUARES	t FOR HO PARAMETER=0	PROB > t
Intercept	0.162187	1		5.682	0.0001
A	0.122812	1	0.482653	4.303	0.0005
B	0.044062	1	0.062128	1.544	0.1422
AB	0.008438	1	0.002278	0.296	0.7713
C	0.031562	1	0.031878	1.106	0.2852
AC	0.020938	1	0.014028	0.734	0.4739
BC	0.054687	1	0.095703	1.916	0.0734
ABC	0.047812	1	0.073153	1.675	0.1134
D	0.017188	1	0.009453	0.602	0.5555
AD	0.014063	1	0.006328	0.493	0.6289
BD	-0.014688	1	0.006903	-0.515	0.6139
ABD	-0.021562	1	0.014878	-0.755	0.4610
CD	0.056562	1	0.102378	1.982	0.0650
ACD	0.024687	1	0.019503	0.865	0.3999
BCD	0.058437	1	0.109278	2.047	0.0574
ABCD	0.022813	1	0.016653	0.799	0.4359
Std ERROR	0.0285438				

c) DIAGRAMA-METADE DE PROBABILIDADE NORMAL.

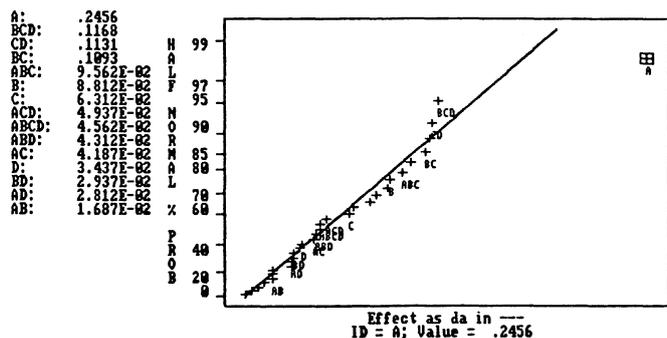


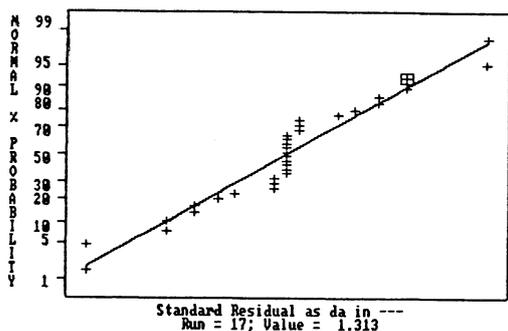
fig.5.29-Módulos dos efeitos sobre d_a , versus a probabilidade deles terem ocorrido por pura chance.

d) VALORES PREVISTOS PELO MODELO AJUSTADO E RESÍDUOS

Std Ord	ACTUAL VALUE	PREDICTED VALUE	RESIDUAL	STANDARDIZED RESIDUAL	COOK'S D	t VALUE	Run Ord
1	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	11
2	0.300000	0.215000	0.085000	0.7445	0.035	0.734	22
3	0.000000	0.115000	-0.115000	-1.0072	0.063	-1.008	13
4	0.500000	0.350000	0.150000	1.3138	0.108	1.347	17
5	0.030000	0.015000	0.015000	0.1314	0.001	0.127	9
6	0.000000	0.115000	-0.115000	-1.0072	0.063	-1.008	1
7	0.030000	0.015000	0.015000	0.1314	0.001	0.127	21
8	0.270000	0.335000	-0.065000	-0.5693	0.020	-0.557	32
9	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	26
10	0.500000	0.350000	0.150000	1.3138	0.108	1.347	19
11	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	25
12	0.030000	0.015000	0.015000	0.1314	0.001	0.127	10
13	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	7
14	0.500000	0.250000	0.250000	2.1896	0.300	2.533	16
15	0.170000	0.170000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	15
16	0.900000	0.650000	0.250000	2.1896	0.300	2.533	20
17	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	31
18	0.130000	0.215000	-0.085000	-0.7445	0.035	-0.734	2
19	0.230000	0.115000	0.115000	1.0072	0.063	1.008	28
20	0.200000	0.350000	-0.150000	-1.3138	0.108	-1.347	27
21	0.000000	0.015000	-0.015000	-0.1314	0.001	-0.127	23
22	0.230000	0.115000	0.115000	1.0072	0.063	1.008	30
23	0.000000	0.015000	-0.015000	-0.1314	0.001	-0.127	3
24	0.400000	0.335000	0.065000	0.5693	0.020	0.557	6
25	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	18
26	0.200000	0.350000	-0.150000	-1.3138	0.108	-1.347	8
27	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	24
28	0.000000	0.015000	-0.015000	-0.1314	0.001	-0.127	14
29	0.000000	-0.000000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	12
30	0.000000	0.250000	-0.250000	-2.1896	0.300	-2.533	5
31	0.170000	0.170000	0.000000	0.0000	0.000	0.000	29
32	0.400000	0.650000	-0.250000	-2.1896	0.300	-2.533	4

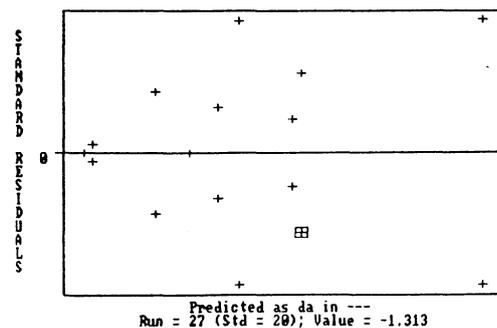
e) DIAGRAMAS PARA CHECAGEM DA ADEQUAÇÃO DO MODELO UTILIZADO

20: 2.189
16: 2.189
4: -2.189
5: -2.189



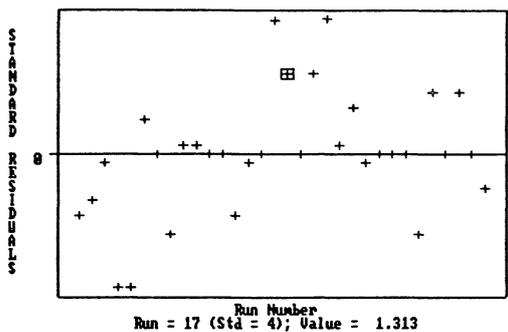
(a)

4: -2.189
20: 2.189
5: -2.189
16: 2.189



(b)

20: 2.189
16: 2.189
5: -2.189
4: -2.189



(c)

fig. 5.30-Diagramas de resíduos:

- a) Diagrama de probabilidade normal para os resíduos.
- b) Resíduos x valores previstos pelo modelo.
- c) Resíduos x ordem de corrida dos experimentos.

f) OBSERVAÇÕES

MODELO UTILIZADO	$\hat{y}_{ijkl} = 16 + (12)i + (4)j + (1)ij + (3)k + (2)ik + (6)jk + (5)ijk + (2)l + (1)il + (-2)jl + (-2)ijl + (6)kl + (3)ikl + (6)jkl + (2)ijkl$
ADEQUAÇÃO DO MODELO	<p>O afunilamento do espalhamento no diagrama dos "resíduos x valores previstos" não deve causar preocupação. Já foi observado anteriormente (na análise de h) que a presença de estruturas nesse diagrama não afetam significativamente os resultados da análise, para o tipo de modelo que se está utilizando.</p>
RESULTADOS DA ANOVA	<p>Assume-se o efeito, A, sobre a densidade relativa dos picos anômalos. Estudos adicionais são necessários para BC, CD e BCD, para os quais a significância do teste-t não foi suficientemente alta. A despeito do baixo nível de significância do teste F para o modelo (97%), os resultados da ANOVA para suas parcelas estão sendo assumidas por motivos alheios à estatística: durante os ensaios, notou-se que era pequeno o tempo de varredura (80ns) dos registros de osciloscópio, o que acarretou a grande dispersão nos valores de d_a.</p>

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Nos capítulos 2, 3 e 4 descreveu-se o projeto, os resultados e a execução dos experimentos fatoriais empregados no estudo da câmara de descarga da tocha mostrada nas figs.1.1, 4.1 e nas fotos do apêndice B. O objetivo central desses experimentos foi a prospecção de variáveis que pudessem aumentar a precisão e/ou a generalidade das eqs.(19) e (20) que descrevem o comportamento elétrico e térmico da tocha estudada. A análise dos resultados, apresentada no capítulo 5 e resumida na tab.6.1, permite concluir que:

- 1- as informações oriundas da análise são fidedignas, uma vez que foram confirmados os efeitos, a priori conhecidos^[7], do diâmetro do anodo sobre a queda de tensão na tocha, U_t , e sobre as perdas de calor para os eletrodos.
- 2- o diâmetro do anodo é o parâmetro geométrico mais importante a ser considerado no desenvolvimento de

tochas do tipo da fig.1.1, pois, entre os efeitos avaliados, A foi o mais forte e frequente, só não tendo sido detectado sobre as respostas L_v e D.

RESPOSTA	EFEITOS SEGURAMENTE ESTABELECIDOS	EFEITOS A CONFIRMAR
U_t	A	B, AC, BC e ABCD
Q_a	A	C e AD
Q_c	A, B e AB	AB
L	A e BC	BC e D
L_v	-----	AB
D_c	A	D
H	A e AB	BD, CD, e BCD
D	-----	-----
h_a	A	-----
d_a	A	CD e BCD

Tab.6.1-Resultados da análise dos experimentos fatoriais conduzidos para levantar a influência da geometria da câmara de descarga no comportamento da tocha estudada. Os efeitos A, B, C e D correspondem às variáveis: a=diâmetro do anodo, b=diâmetro dos orifícios de injeção, c=espessura da câmara de vórtice, d=diâmetro da câmara de vórtice.

3- não está descartada a possibilidade de se melhorar a eq.(19) (relação $U_t \times I$) pela inclusão de novas variáveis geométricas, além do diâmetro do anodo: o resultado da tab.6.1 relativo a U_t mostra que efeitos importantes podem ter sido escondidos pela dispersão errática das medidas.

- 4- a eq.(20) descreverá com maior acuidade as perdas de calor para o catodo se o diâmetro, b , dos orifícios de injeção for incluído.
- 5- a posição média do engate do pé do arco sobre a superfície do anodo é afetada pelo diâmetro dos orifícios de injeção em conjunto com a espessura da câmara de vórtice.
- 6- o desgaste do catodo é afetado pelo diâmetro do anodo. O resultado da tab.6.1 para D_c pode ser incompleto, devido à grande dispersão errática nas medidas para D_c . Com certeza, a variável mais importante para D_c não foi controlada nos experimentos.
- 7- a altura total média, H , dos picos de corrente é afetada pelos diâmetros do anodo e dos orifícios de injeção.
- 8- a densidade, D , dos picos de corrente não é sensível a alterações na geometria da câmara de descarga. Aparentemente, este parâmetro é definido somente pela frequência do "ripple" da fonte de alimentação (apêndice A), que é a origem das oscilações^[22].
- 9- a altura e a frequência relativa dos picos anômalos

de corrente dependem do diâmetro do anodo.

10- outros efeitos, além dos assumidos neste trabalho, podem estar presentes (3ª coluna da tab.6.1). Para separá-los do ruído experimental, deve-se reduzir as variações erráticas e/ou realçar os efeitos dos tratamentos aumentando-se as distâncias entre os níveis escolhidos para as variáveis (secção 2.2).

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os planos para trabalhos futuros são uma consequência direta da natureza iterativa da abordagem empregada nesta dissertação para incrementar as eqs.(19) e (20) com variáveis da câmara de descarga da tocha da fig.4.1. Pode-se dar continuidade a este trabalho:

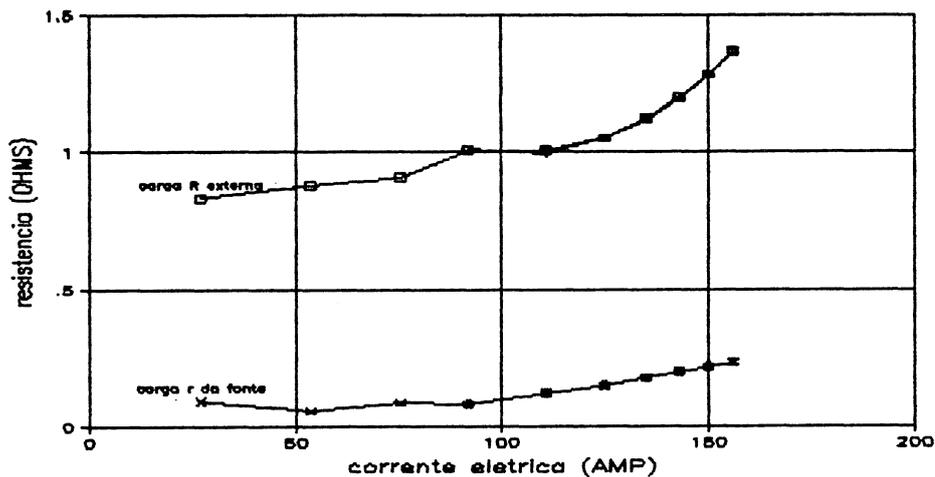
- 1- com a identificação das principais variáveis responsáveis pela ocorrência dos picos anômalos (instabilidades), através de um projeto de experimentos em que as varreduras de osciloscópio sejam mais longas e que inclua o comprimento do anodo como variável. A identificação de tais variáveis possibilitará a redução da variância errática nas medidas das outras respostas da tab.3.1.
- 2- com o desenvolvimento de um encaixe para o catodo para o qual as variações erráticas nos valores do desgaste sejam menores (alguns resultados estão mostrados no apêndice B).

- 3- com a reavaliação dos efeitos da geometria da câmara de vórtice, através de um projeto de experimentos em que as distâncias entre os níveis tomados para os parâmetros sejam maiores. Este procedimento tem como meta acentuar os efeitos estatisticamente pouco expressivos observados na análise, no capítulo 5.

- 4- com a implementação das equações (19) e (20) com as novas variáveis levantadas no item (3), acima, e verificação final da eficácia de (19) e (20) modificadas, no sentido de ajustarem melhor, ou não, os pontos experimentais sobre uma única curva generalizada.

APÊNDICE A: CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ELEMENTOS DOS CIRCUITOS
ACOPLADOS À TOCHA.

As características mais importantes dos vários elementos que estiveram acoplados à tocha durante os experimentos estão representadas nas figuras que seguem. Nas fig's. B-1 e B-2, o método dos mínimos quadrados foi empregado para ajustar fórmulas sobre os intervalos de maior interesse. Abaixo, mostra-se a resistência interna r e a carga externa R (cap.4, fig.4.1) em função da corrente elétrica lida no painel da fonte de alimentação:

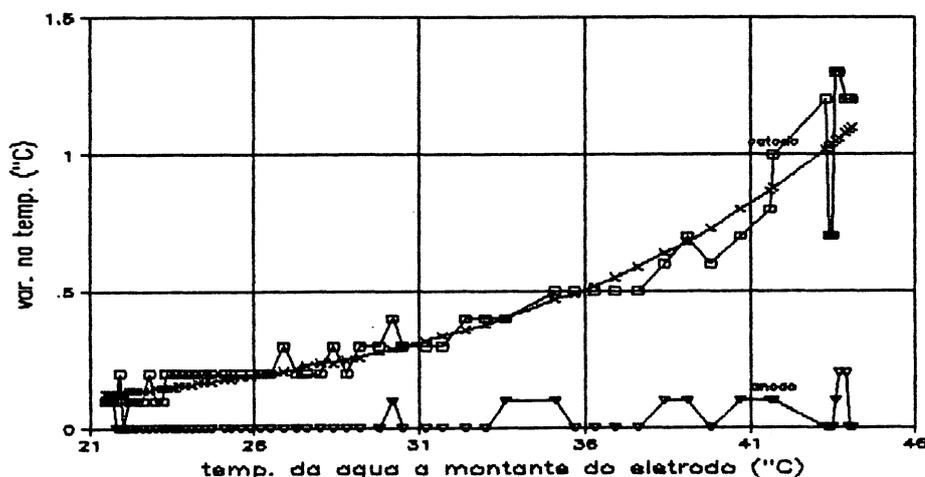


$$R = 2.48 - 2.96E-2xI + 1.38E-4xI^2 \dots (100A < I < 156A; \sigma_R = .005)$$

$$r = -.016 + 2.84E-4xI + 8.49E-6xI^2 \dots (100A < I < 156A; \sigma_r = .002)$$

fig.A-1: Resistências (em ohms) ligadas em série com a tocha em função da corrente no circuito da fig.4.3-a. A carga, R, foi resfriada por um ventilador. σ_R e σ_r representam os desvios padrão nas estimativas de R e r.

Após alguns experimentos com a tocha, aproveitou-se o fato de o reservatório estar cheio de água quente para estudar as perdas de calor para as tubulações entre os pontos do circuito hidráulico em que as temperaturas foram lidas nos dois eletrodos. Com a tocha desligada, a água foi mantida circulando durante aproximadamente 13 horas. As temperaturas foram lidas a cada 15 minutos e os resultados estão apresentados na fig.A-2:



$$\Delta T_{t,c} = 0.016 \exp(0.196 T_m) \dots (21.5^\circ\text{c} < T_m < 41.0^\circ\text{c}, \sigma_{\Delta T} = .21^\circ\text{c})$$

fig.A-2: variação na temperatura (em °C) da água de refrigeração, devido às perdas de calor para as tubulações, em função da temperatura, T_m , medida pelo termopar a montante de cada eletrodo (fig.4.3). $\sigma_{\Delta T}$ é o desvio padrão nas estimativas para ΔT .

Nas figuras que seguem, são mostrados alguns registros de osciloscópio da queda de tensão sobre a carga resistiva, R, (da fig.4.1-a) quando ela foi acoplada sozinha à fonte que

forneceu potência à tocha durante os ensaios. A corrente lida no painel da fonte está indicada por I_f . O valor da carga, R , foi obtido da fig.A-1. A frequência da onda registrada é de aproximadamente 120Hz.

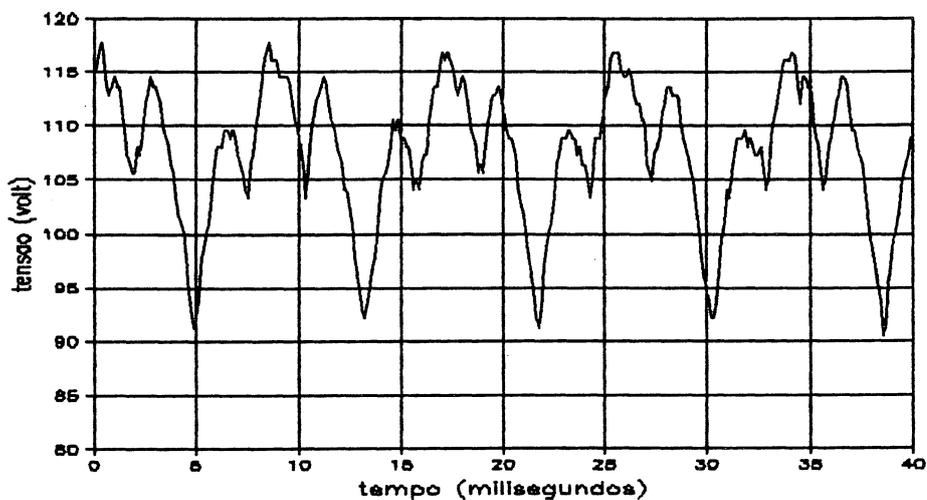


fig.A-3: "Ripple" da fonte hipotronics, modelo MTA4-300/MTD. 5-150. $I_f = 110A$ e $R = 1.00 \Omega$.

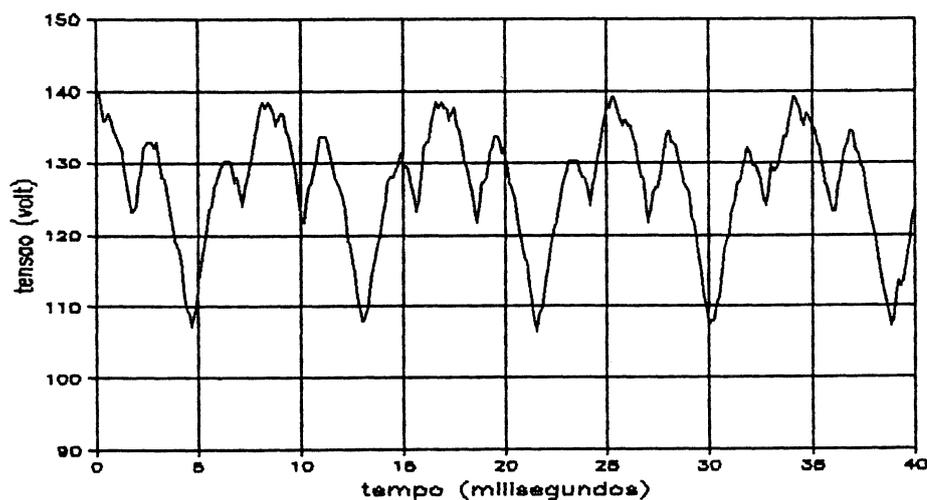


fig.A-4: "Ripple" da fonte hipotronics, modelo MTA4-300/MTD. 5-150. $I_f = 125A$ e $R = 1.05 \Omega$.

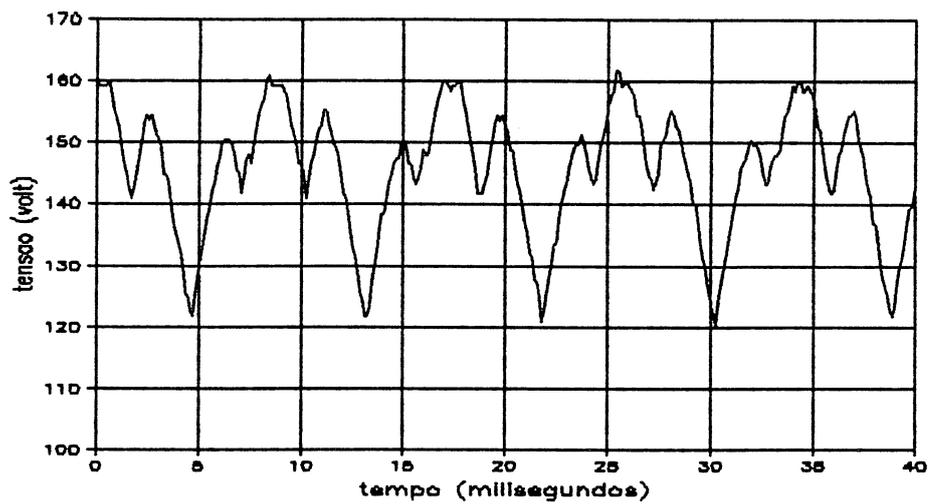


fig.A-5: "Ripple" da fonte hipotronics, modelo MTA4-300/MTD. 5-150. $I_f = 135A$
e $R = 1.12 \Omega$.

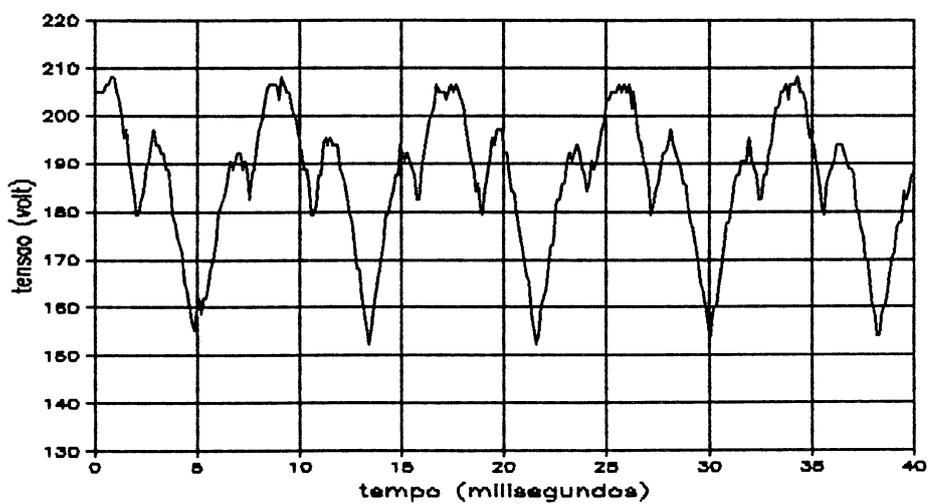


fig.A-6: "Ripple" da fonte hipotronics, modelo MTA4-300/MTD. 5-150. $I_f = 150A$
e $R = 1.28 \Omega$.

APÊNDICE B: FOTOGRAFIAS DA TOCHA UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS

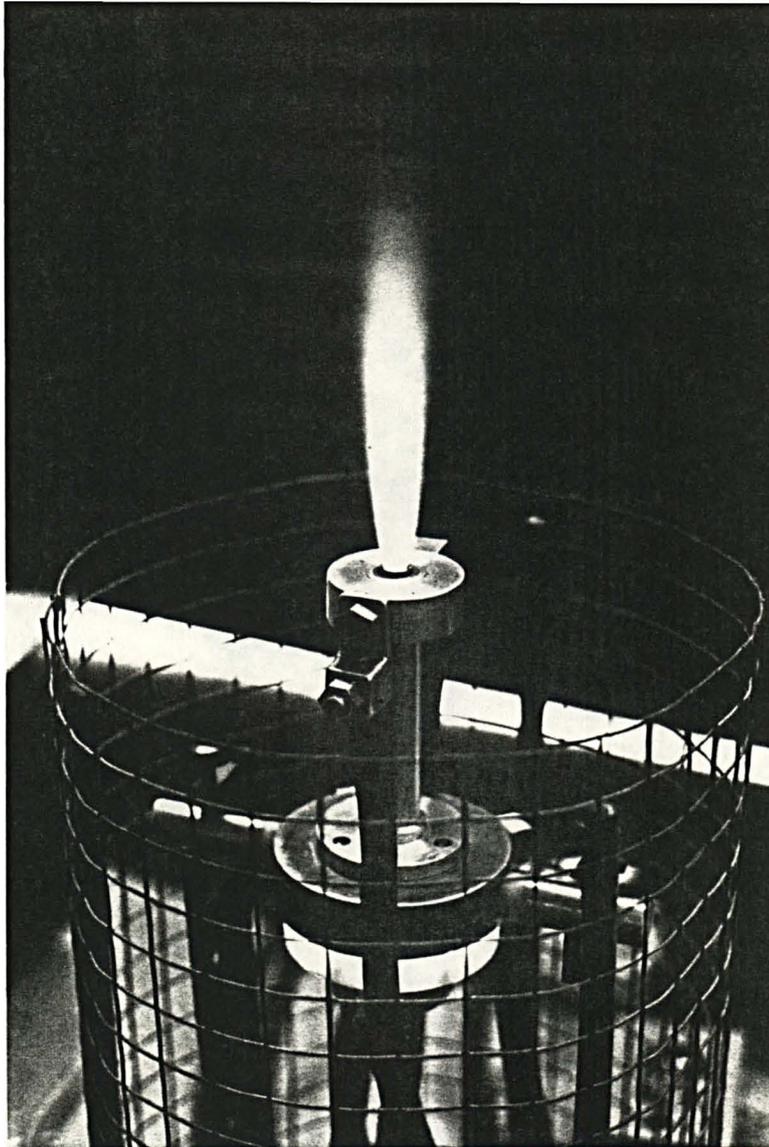


fig. B-1: tocha em operação; $I_t = 130A$, $U_t = 337V$.

Aqui, apresenta-se algumas fotografias mostrando detalhes das várias peças componentes da tocha utilizada nos experimentos deste trabalho. Na fig.B-1, mostra-se a tocha em operação num dos experimentos finais e, na fig.b-2, um desmonte da mesma.

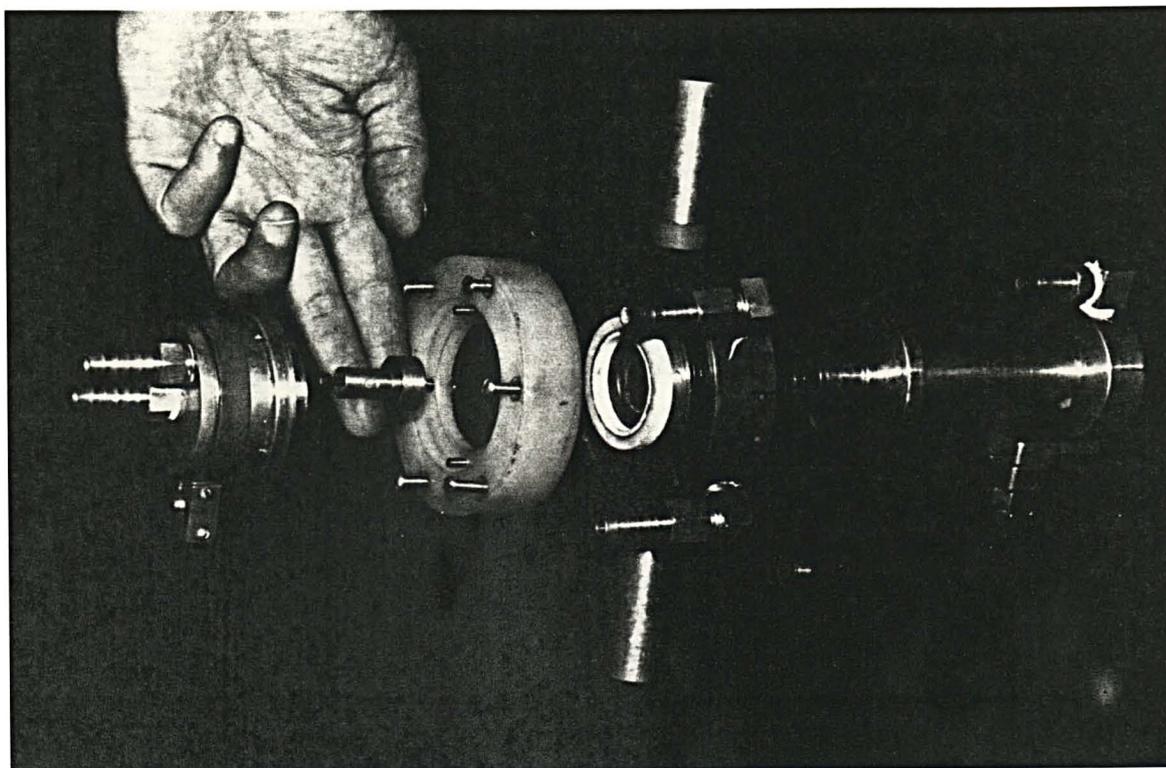


fig. B-2: Desmonte da tocha estudada nesta dissertação.

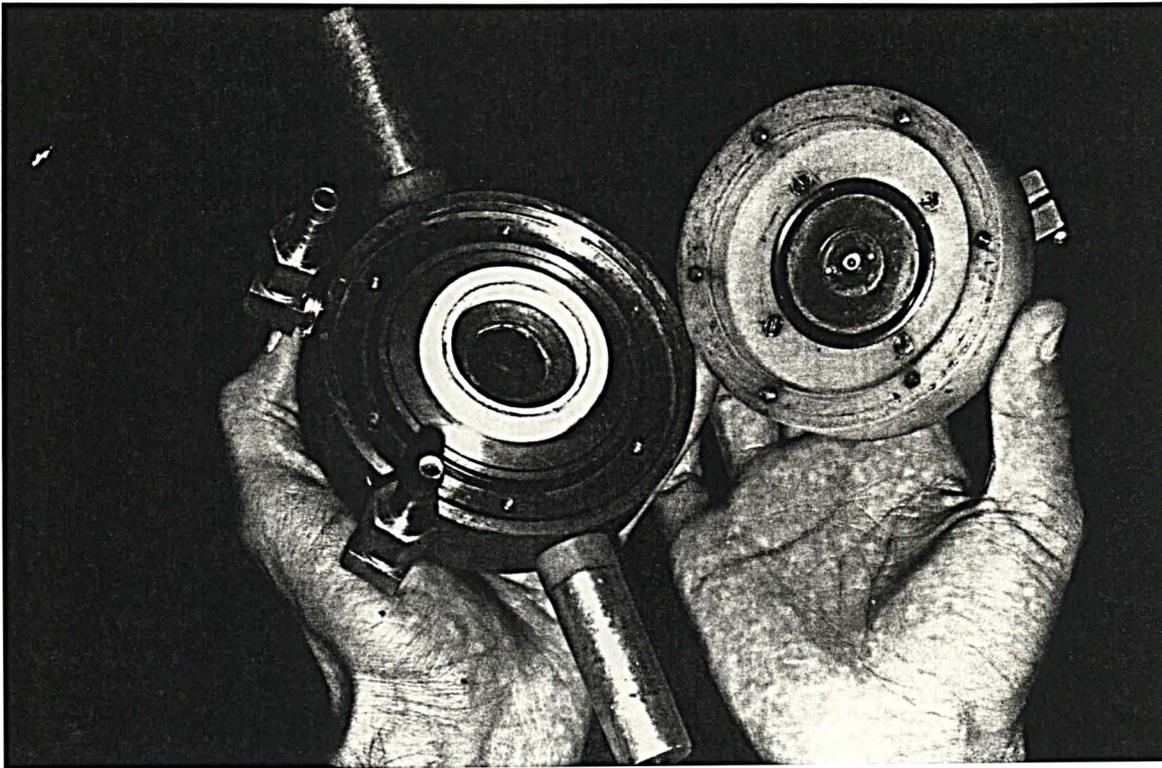


fig.B-3: Detalhes da câmara de vórtice e do posicionamento do catodo: o gás é injetado através da pequena fenda anular, sobre a peça metálica, entre o "o-ring" e a câmara de vórtice.

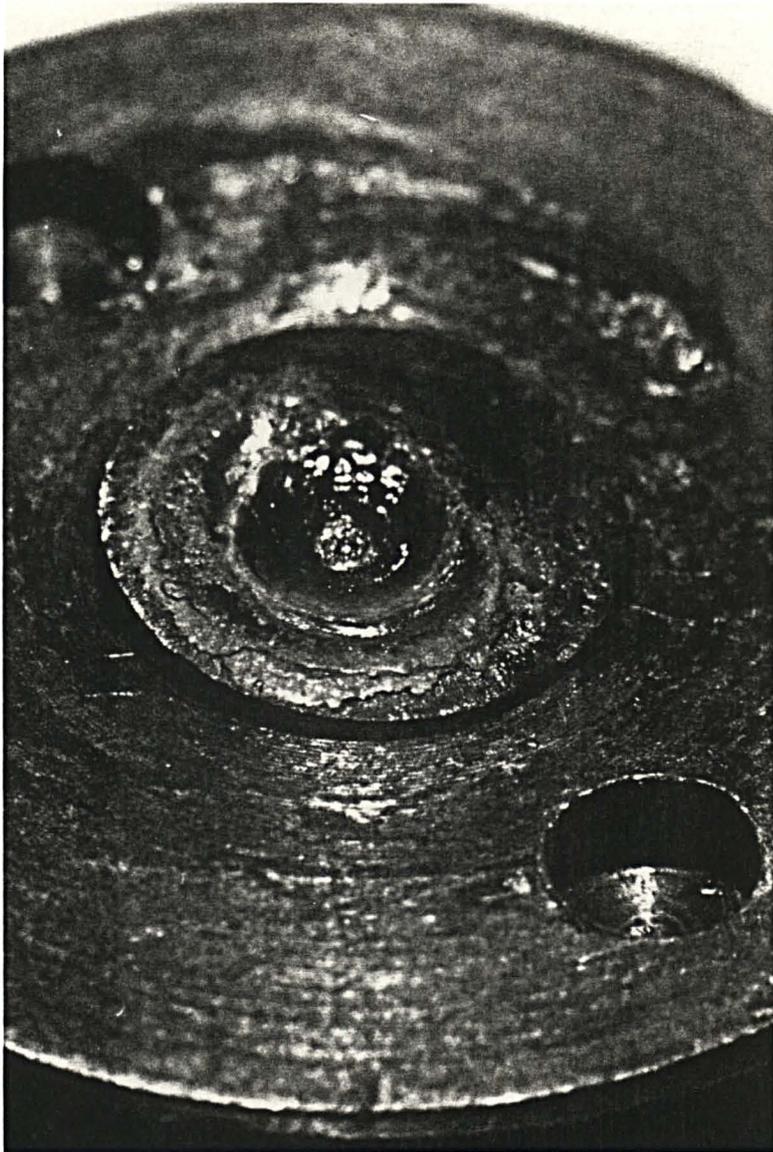


fig. B-4: Vista próxima do catodo utilizado no ensaio 14 (geometria abd), da tab. 3.1: foi o menor desgaste observado.

Na figura abaixo vê-se o encaixe pinçado, desenvolvido para o catodo. O inserte termoemissor é colocado num orifício cilíndrico, situado na extremidade mais fina de um tronco de cone (de cobre). Este, por sua vez, é pressionado, por um parafuso, contra as paredes de um orifício cônico na peça maior (também de cobre). Com este encaixe, obteve-se os pontos do diagrama da fig.D-11 (ap.D) e realizou-se alguns ensaios utilizando catodo de zircônio. Infelizmente, ao contrário das refs.[15] e [18], não foram obtidos bons resultados com o uso do zircônio, como mostram as figs.B-7 e B-8. Todavia, cabe

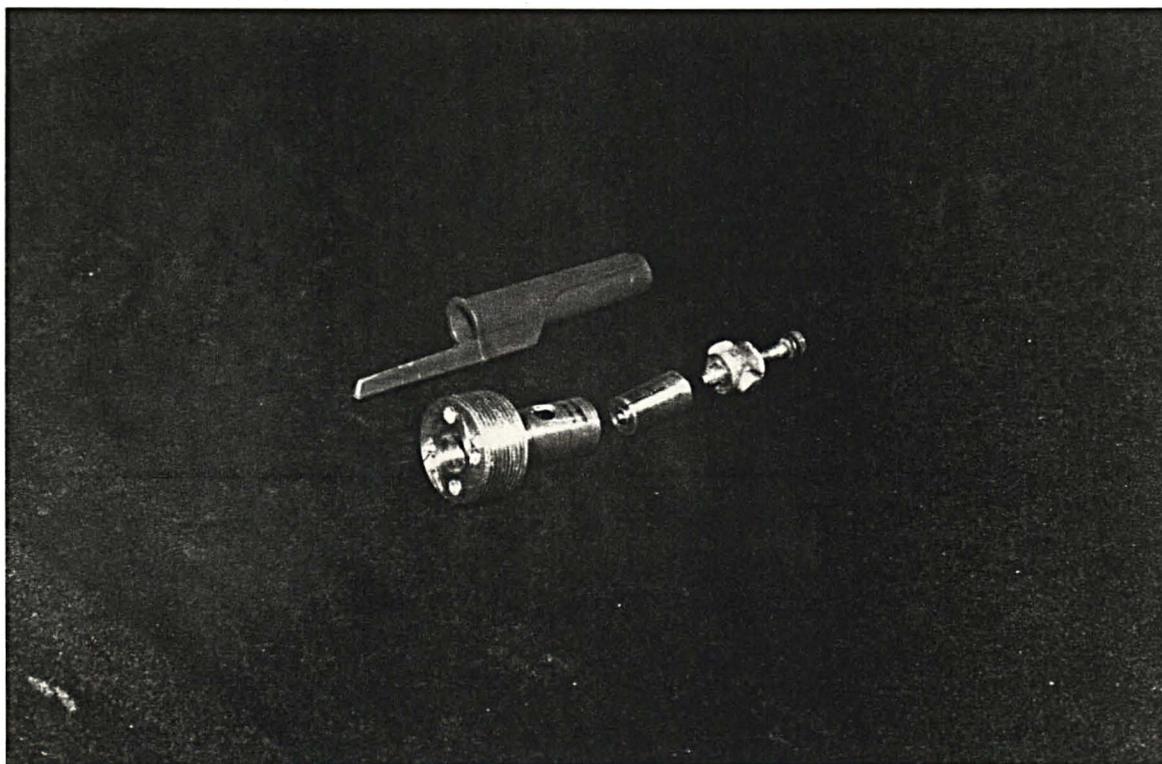


fig. B-5: Catodo com encaixe pinçado, utilizado na construção do gráfico da fig. D-11.

observar que poucas tentativas foram feitas para o uso do zircônio, uma vez que este trabalho já estava na sua fase final quando tal eletrodo tornou-se disponível.



fig.B-6: Catodo de tungstênio (com 2% de tório) após 2 horas de uso (encaixe pinçado)

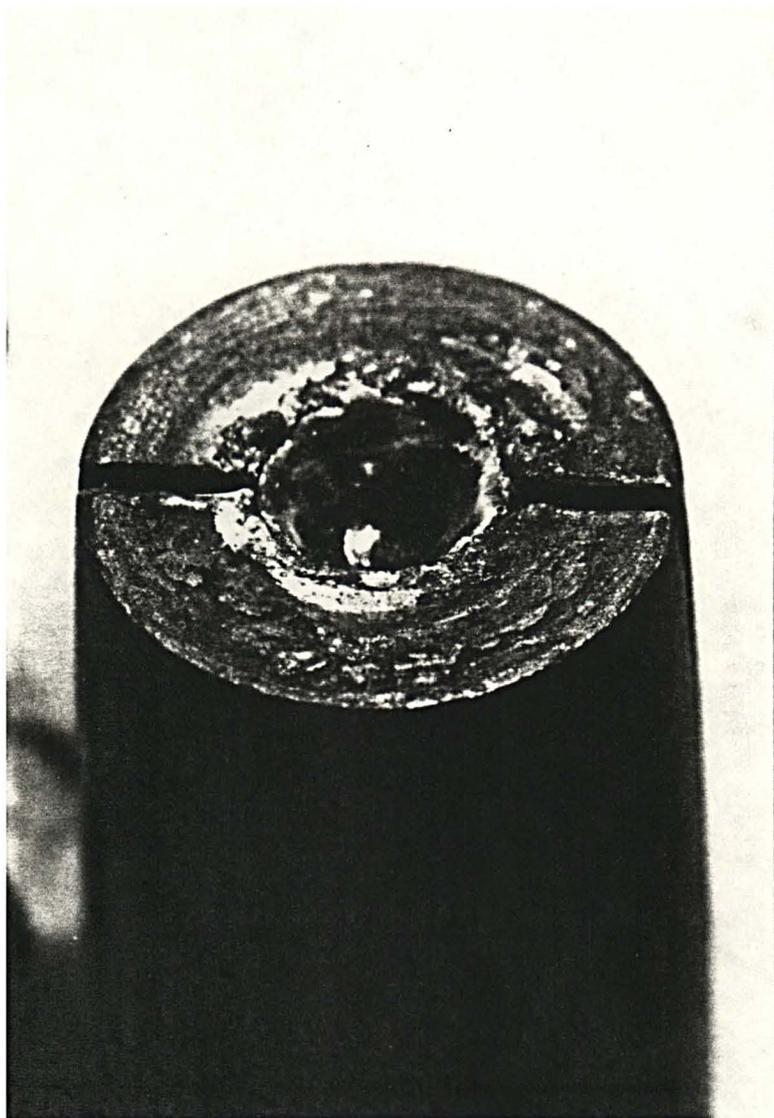


fig. B-7: Catodo de zircônio (encaixe pinçado) após 20 minutos de uso.



fig. B-8: Catodo de zircônio (encaixe pinçado) após 5 minutos de uso.

APÊNDICE C: OSCILAÇÕES NA CORRENTE ELÉTRICA

Os registros, nas figuras que seguem, foram feitos durante os experimentos fatoriais da tab.3.1. Eles mostram oscilações na queda de tensão o limitador de corrente, R, da fig.4.3-a. O valor de R foi obtido da fig.A-1, em função da corrente "média" no circuito (130 amperes), lida no painel da fonte de alimentação durante os ensaios. As duas primeiras figuras mostram ignições, que foram realizadas através de curto-circuito momentâneo provocado por um fino fio de cobre introduzido entre os eletrodos da tocha. As outras 8 figuras mostram registros realizados durante os ensaios 16 (geometria acd) e 26 (geometria d), nos quais a tocha apresentou diferentes níveis de estabilidade.

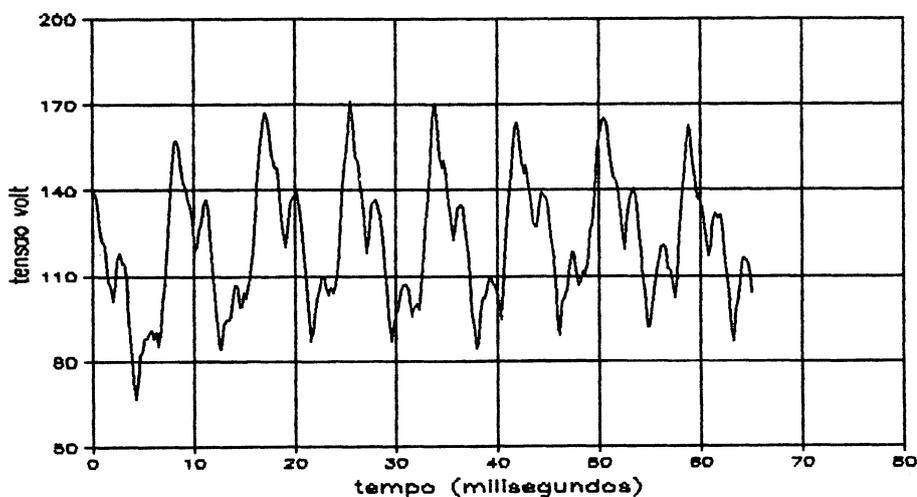


fig.C-1: Tensão sobre o limitador $R(\approx 1\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 11-ignição, geometria (1).

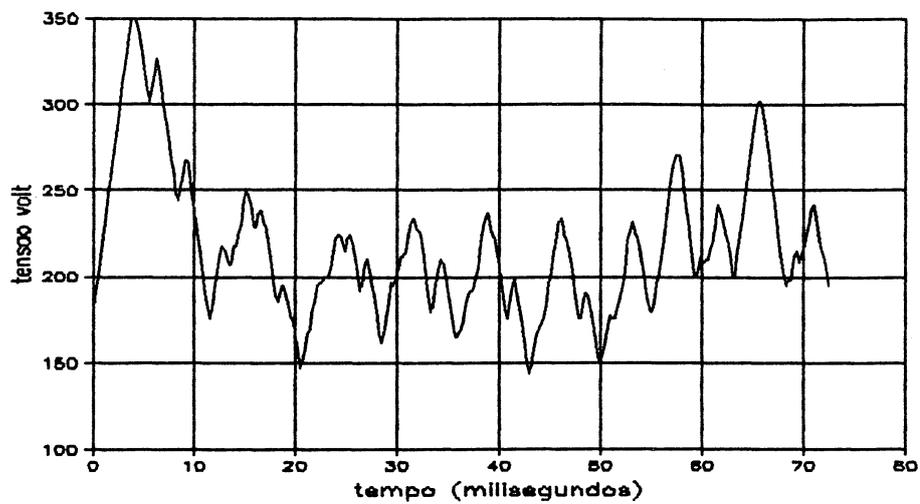


fig.C-2: Tensão sobre o limitador $R(\approx 1\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 31-ignição, geometria (1).

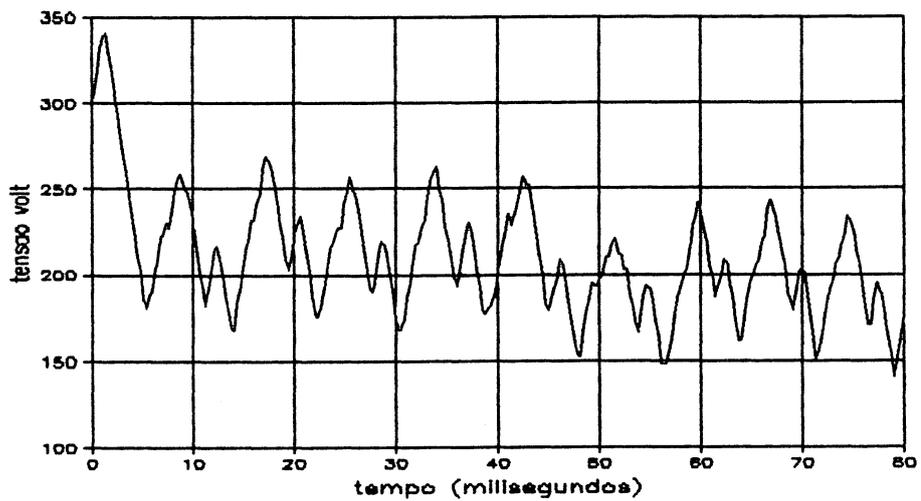


fig.C-3: Tensão sobre o limitador $R(\approx 1\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 16-ignição, geometria acd.

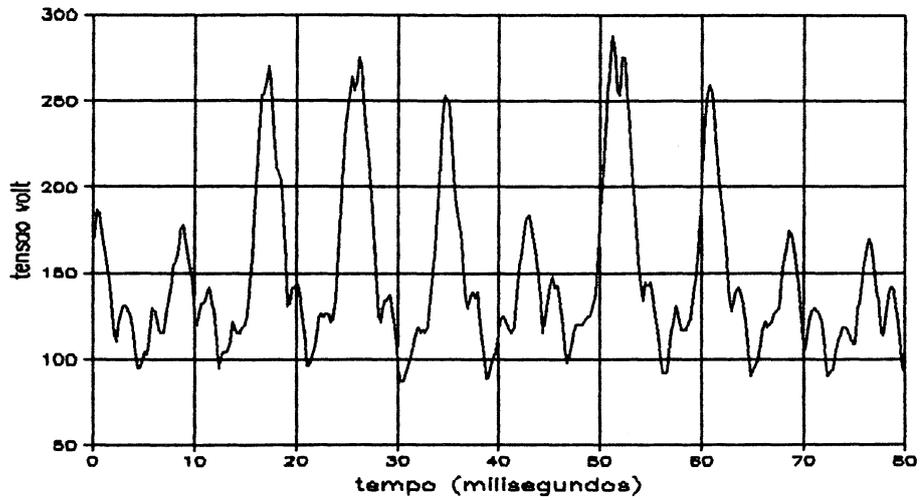


fig.C-4: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 16-leitura 1, geometria acd.

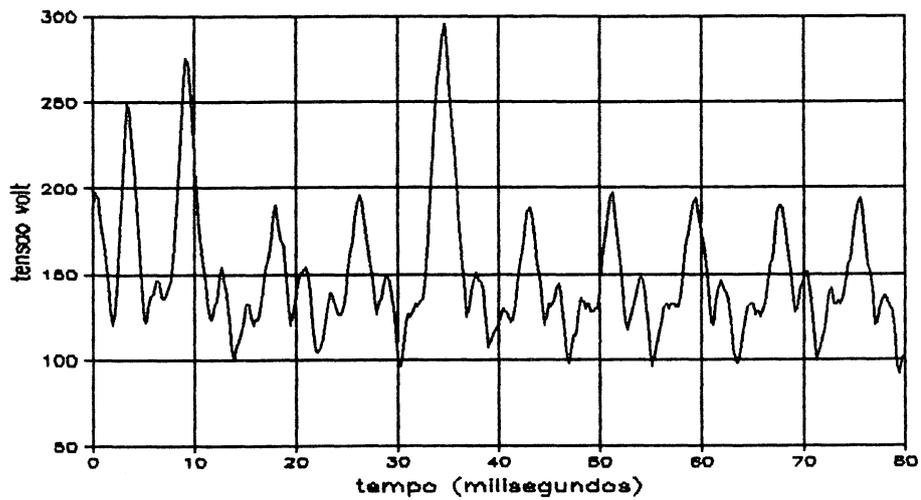


fig.C-5: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 16-leitura 2, geometria acd.

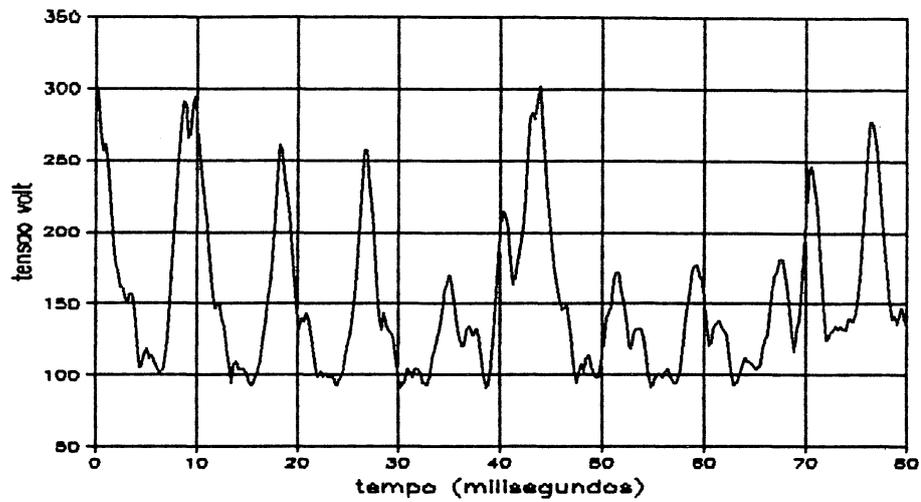


fig.C-6: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a; Tab. 3.1, corrida 16-leitura 3, geometria acd.

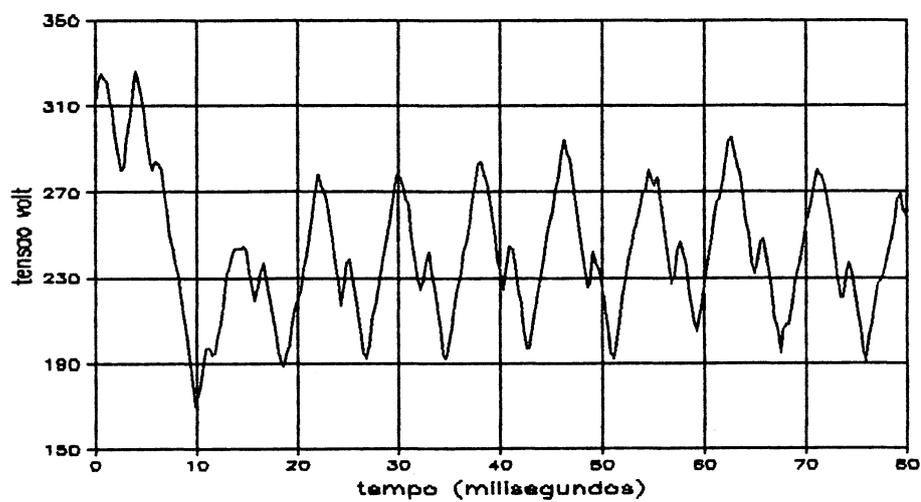


fig.C-7: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a; Tab. 3.1, corrida 26-ignição, geometria d.

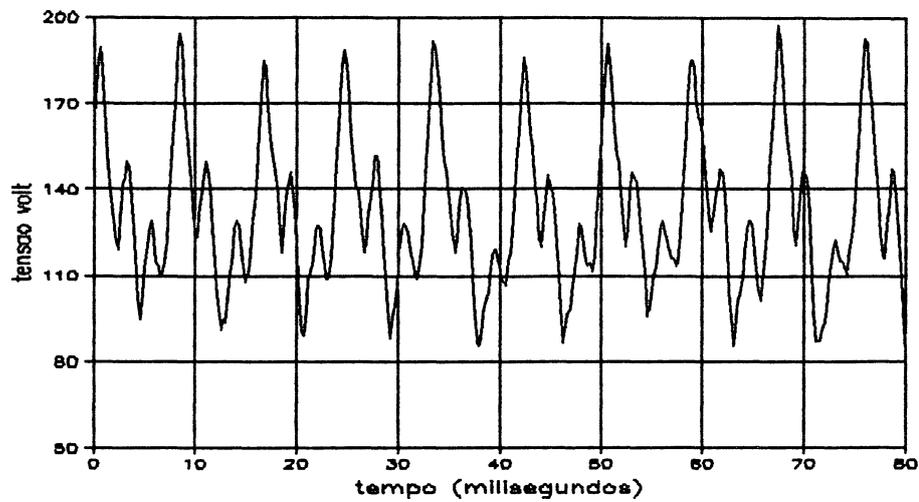


fig.C-8: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 26-leitura 1, geometria d.

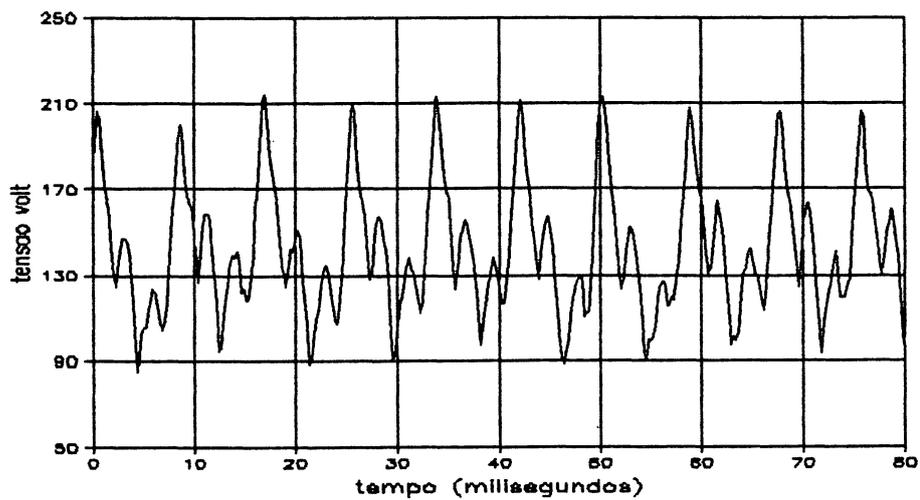


fig.C-9: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a: Tab. 3.1, corrida 26-leitura 2, geometria d.

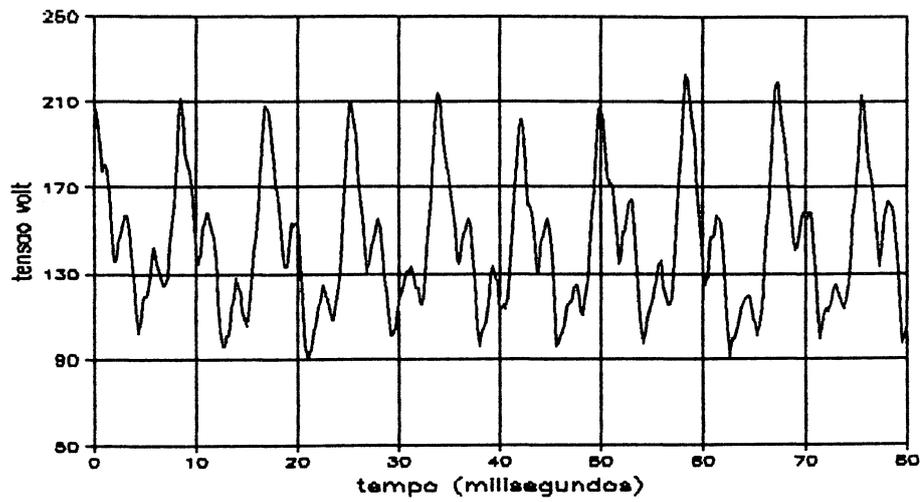


fig.C-10: Tensão sobre o limitador $R (= 1.08\Omega)$ da fig. 4.3-a; Tab. 3.1, corrida 26-leitura 3, geometria d.

APÊNDICE D: CURVAS CARACTERÍSTICAS DA TOCHA DE PLASMA

Além dos experimentos fatoriais discutidos, outros também foram realizados para produzir os diagramas que seguem. Neles, cada ponto representa a média aritmética dos resultados de duas medidas. Cada curva, que resultou da união dos pontos adjacentes por segmentos de reta, corresponde a uma nova ignição da tocha. Nos diagramas da fig.D-1 até a fig.D-10, procurou-se expressar relações, entre os vários parâmetros da tocha (Q_a , Q_c , U_t , ..., etc.) e a corrente elétrica ou vazão de ar. A geometria da tocha não foi mudada durante todos os experimentos (foi a mesma das corridas 1 e 26, na tab.3.1) e foi escolhida entre aquelas que proporcionaram maior estabilidade durante os experimentos fatoriais. Na fig.D-11 estão os valores determinados para o desgaste específico do catodo (de tungstênio) em função do tempo. O funcionamento da tocha foi estável ao longo de todo o diagrama. A tentativa de construir um diagrama análogo utilizando um catodo de zircônio foi frustrada pela vida demasiadamente curta conseguida para esse eletrodo. Com catodo de tungstênio, foi possível operar a tocha durante mais de duas horas sem interrupção (ver fig.B-6), ao passo que, com zircônio, não se passou dos 20 minutos.

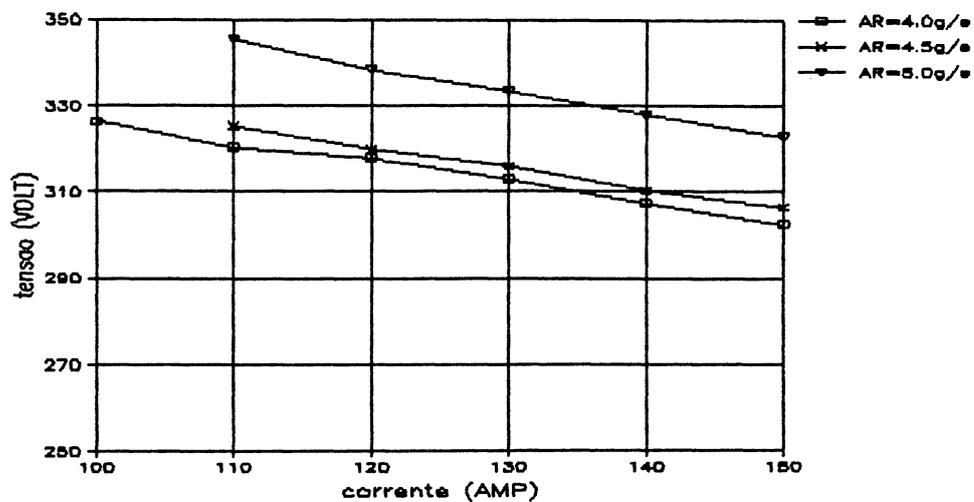


fig.D-1: Queda de tensão na tocha versus corrente elétrica, para $G = 4.0, 4.5$ e 5.0 g/s.

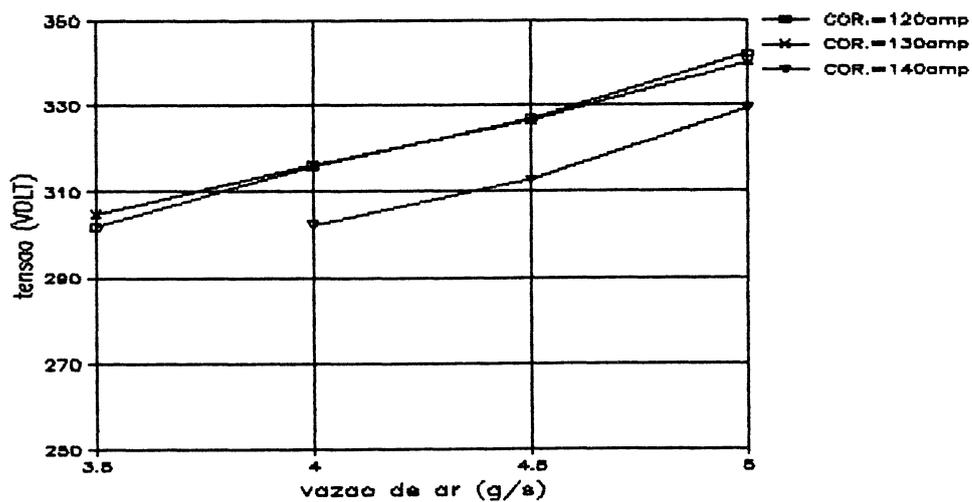


fig.D-2: Queda de tensão na tocha versus vazão de ar para $I = 120, 130$ e 140 A.

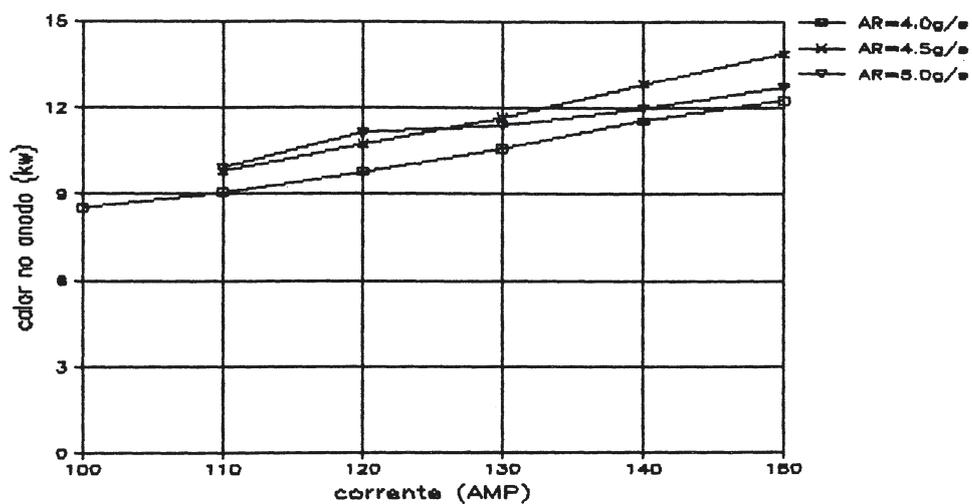


fig.D-3: Fluxo de calor para o anodo versus corrente elétrica, para $G = 4.0$, 4.5 e 5.0 g/s.

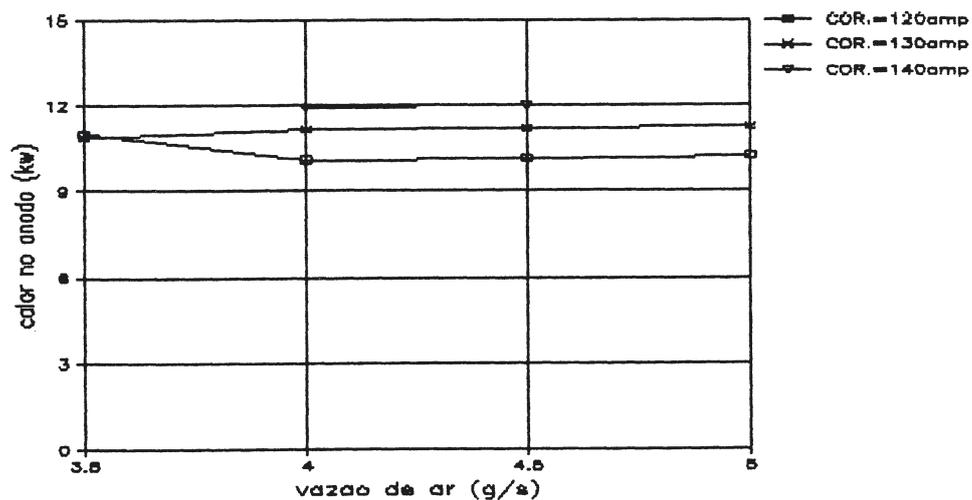


fig.D-4: Fluxo de calor para o anodo versus vazão de ar, para $I = 120$, 130 e 140 A.

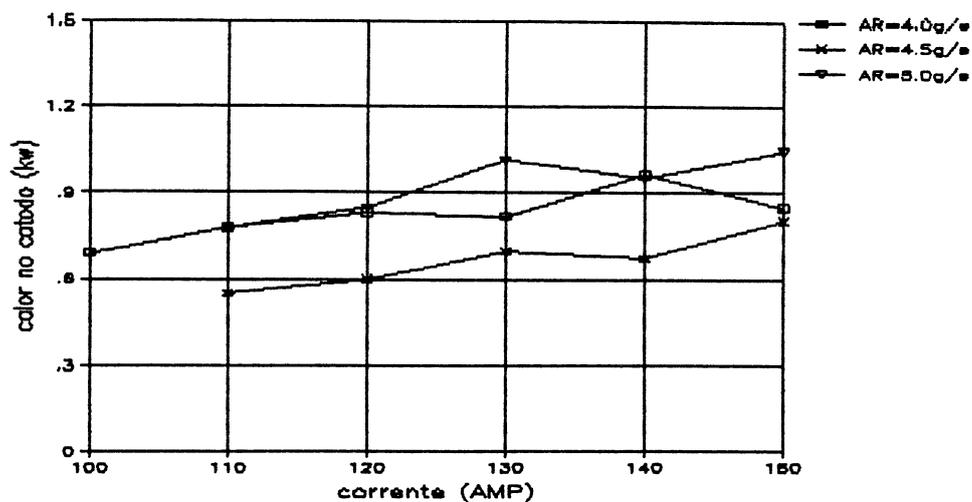


fig. D-5: Fluxo de calor para o catodo versus corrente elétrica, para $G = 4.0$, 4.5 e 5.0 g/s.

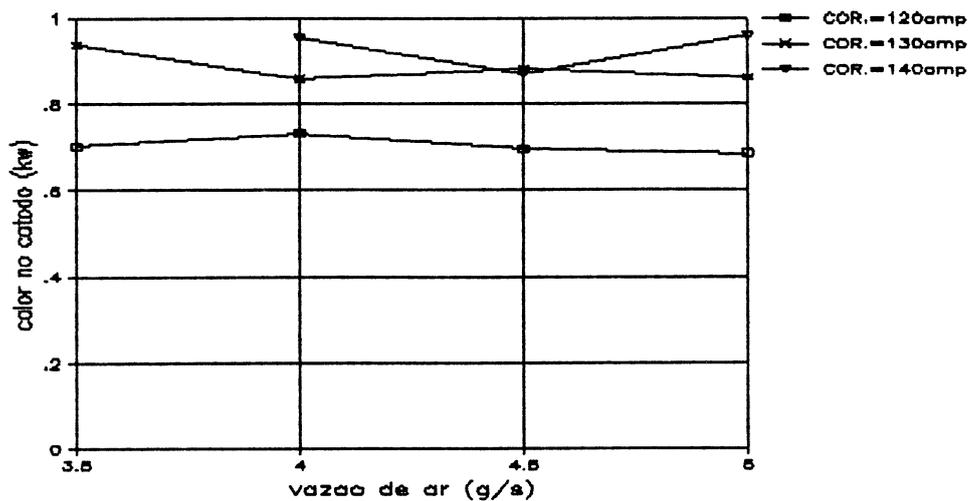


fig. D-6: Fluxo de calor para o catodo versus vazão de ar, para $I = 120$, 130 e 140 A.

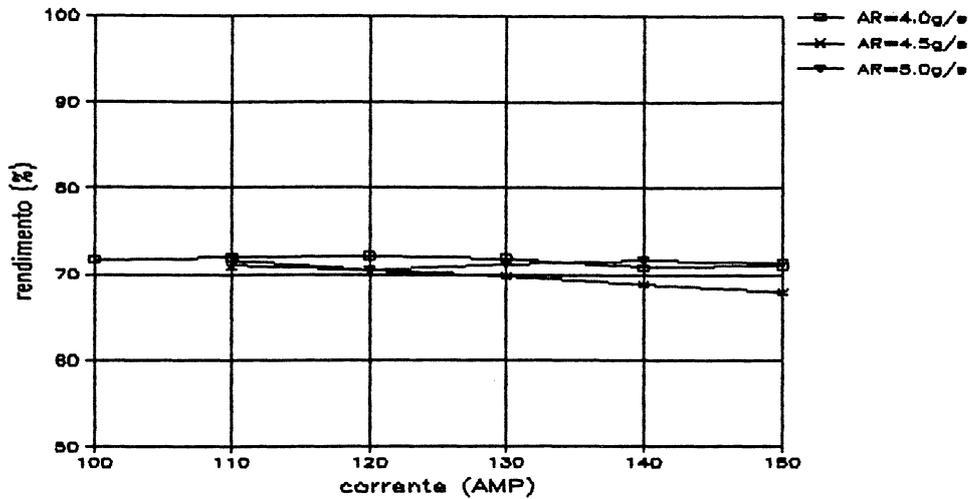


fig. D-7: rendimento da tocha versus corrente elétrica, para $G=120, 130$ e 140 A. O rendimento sendo definido por:

$$\text{rendimento} = \frac{U_t \cdot I}{U_t \cdot I - Q_a - Q_c}$$

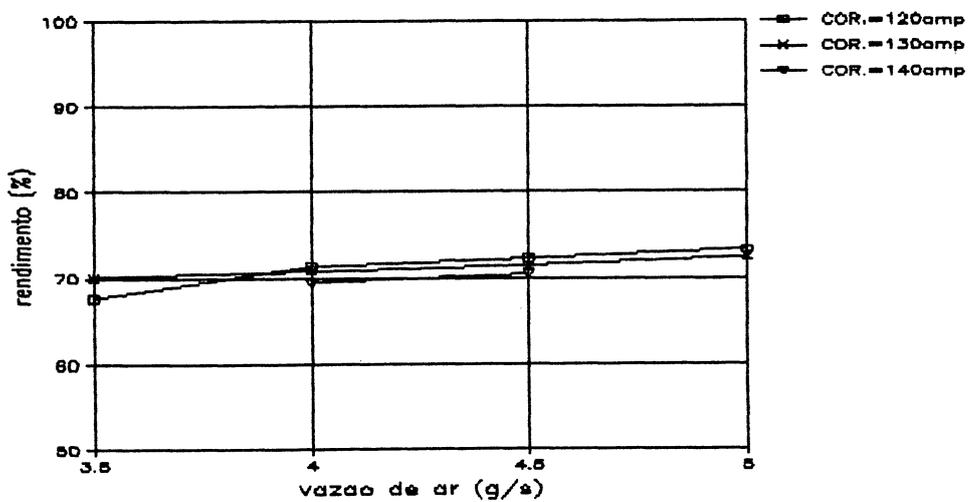


fig. D-8: rendimento da tocha versus vazão de ar, para $I=120, 130$ e 140 A.

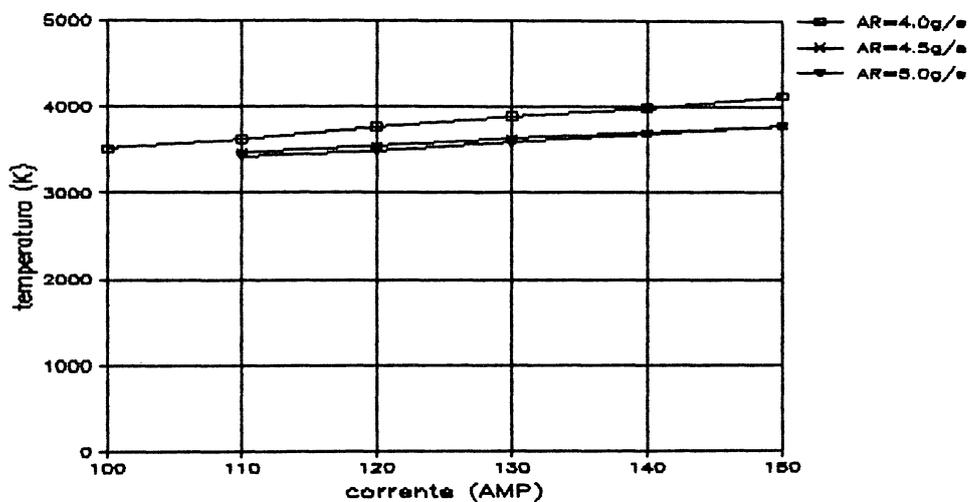


fig.D-9: Temperatura da chama versus corrente elétrica, para $G = 4.0, 4.5$ e 5.0 g/s. Estes valores foram obtidos através das tabelas HxT da ref. [23].

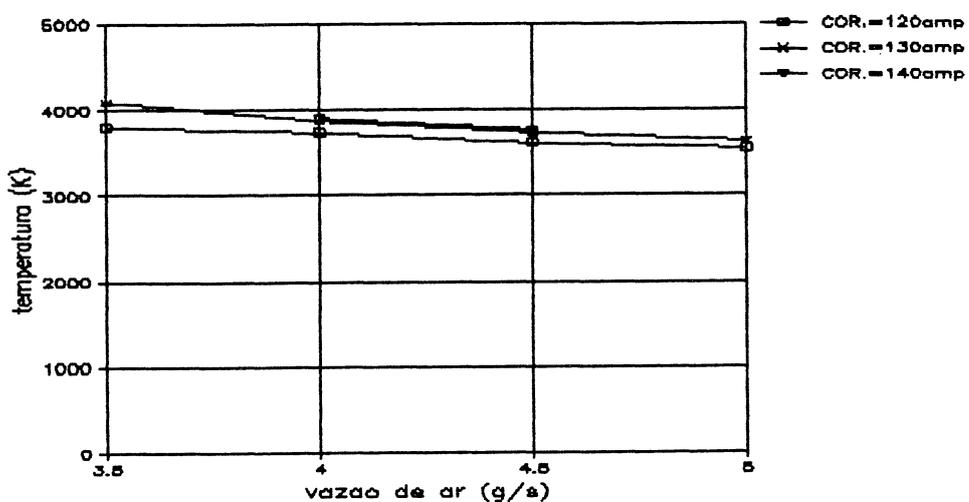


fig.D-10: Temperatura da chama versus vazão de ar, para $I = 120, 130$ e 140 A. Estes valores foram obtidos através das tabelas HxT da ref. [23].

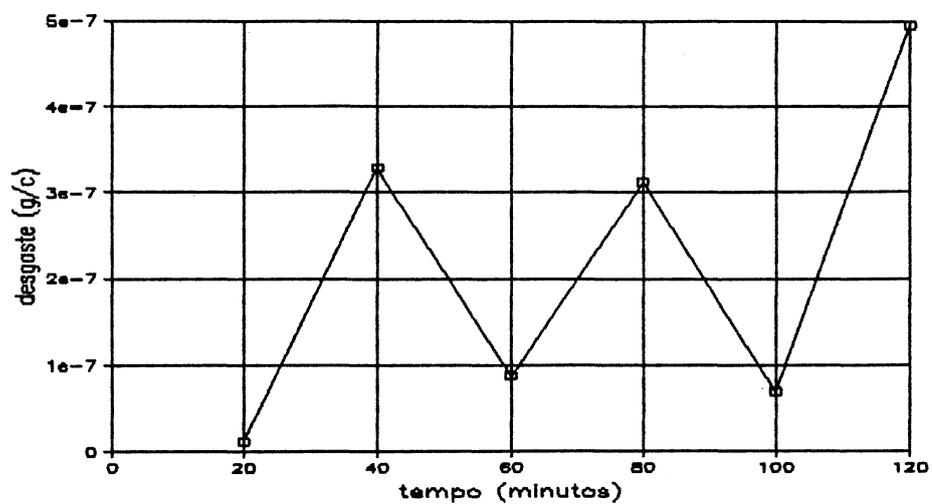


fig.D-11: Desgaste específico do catodo versus tempo, para $I = 120$ A e $G = 4.5$ g/s. A fig.B-11 mostra uma foto do tipo de catodo empregado. Consiste de um inserte de tungstênio pinçado por um suporte de cobre.

APÊNDICE E: DESCRIÇÃO DE ALGUNS ELEMENTOS UTILIZADOS NA
ANÁLISE ESTATÍSTICA.

i) Modelo Estatístico

Empregando a notação utilizada na ref.[12], quando os 4 parâmetros estudados de um sistema (a,b,c e d) assumem, respectivamente, os níveis i,j,k e l, pertencentes ao conjunto dos arranjos fatoriais possíveis para todos os níveis considerados de a,b,c e d, o valor da resposta, y, para a m-ésima repetição do experimento, é dado por:

$$y_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \tau_l + (\tau\alpha)_{ij} + \dots + (\gamma\tau)_{kl} + \\ + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \dots + (\beta\gamma\tau)_{jkl} + (\alpha\beta\gamma\tau)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm} \quad (E-1)$$

onde:

i= 1, 2, ..., a (níveis para o parâmetro a)

j= 1, 2, ..., b (níveis para o parâmetro b)

k= 1, 2, ..., c (níveis para o parâmetro c)

l= 1, 2, ..., d (níveis para o parâmetro d)

m= 1, 2, ..., n (repetição do ensaio para cada conjunto de níveis)

μ = efeito médio global (ou resposta média global)

$\alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \tau_l$ = efeitos de primeira ordem dos fatores a, b, c e d.

$(\tau\alpha)_{ij}, (\tau\beta)_{ik}, \dots, (\beta\gamma)_{kl}$ = efeitos das interações de segunda ordem.

$(\tau\alpha\beta)_{ijk}, \dots, (\alpha\beta\gamma)_{jkl}$ = efeitos das interações de terceira ordem.

$(\tau\alpha\beta\gamma)_{ijkl}$ = efeito da interação de quarta ordem entre a, b, c e d.

ε_{ijklm} = contribuição de variações randômicas em y no experimento (i,j,k,l,m).

Os efeitos acima, dos fatores e de suas interações, são definidos como desvios da resposta, y, em relação à média global, μ . Esta definição implica nas relações:

$$\sum \alpha_i = \sum \beta_j = \sum \gamma_k = \sum \tau_l = 0$$

$$\sum_i (\alpha\beta)_{ij} = \sum_j (\alpha\beta)_{ij} = \dots = \sum_l (\gamma\tau)_{kl} = 0$$

$$\sum_i (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = \sum_j (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = \sum_k (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = \dots = \sum_l (\beta\gamma\tau)_{jkl} = 0$$

$$\sum_i (\alpha\beta\gamma\tau)_{ijkl} = \dots = \sum_l (\alpha\beta\gamma\tau)_{ijkl} = 0$$

que constituirão os "vínculos" necessários ao cálculo dos estimadores para os termos da eq. (E-1), $\hat{y}_{ijkl}, \bar{y}, \hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_j, \dots$, etc, que são utilizados na análise dos resultados dos experimentos fatoriais.

Este é o "modelo de efeitos fixos" (ref.[12], pag.123) para a situação onde há quatro fatores envolvidos. A análise estatística dos resultados dos experimentos é feita sobre as *estimativas* dos termos da eq.(E-1) calculadas a partir dos valores medidos para as respostas y_{ijklm} . Supõe-se, nessa análise, que as variações erráticas nos valores medidos são NID (normal e independentemente distribuídas), isto é, o valor de ε , em (E-1), independe de i, j, k, l ou m . A priori, procura-se garantir a validade desta hipótese randomizando-se a ordem em que os experimentos serão realizados, a posteriori, a análise dos resíduos verificará a ocorrência de possíveis distorções.

Se cada variável (a,b,c e d) for tomada em apenas dois níveis e dois experimentos forem conduzidos para cada y_{ijkl} ($n=2$), ter-se-á um total de $2 \times 2^4 = 32$ valores medidos para y . Uma sequência randomizada desses 32 ensaios constitui um projeto de experimento fatorial 2^4 . Empregando novamente a notação de [12], os efeitos dos fatores e de suas interações, devidos a mudanças nos níveis de a,b,c e d, são definidos por:

$$A, B, \dots, ABCD = \frac{2}{2 \cdot 2^4} (a \pm 1) (b \pm 1) (c \pm 1) (d \pm 1) \quad (E-2)$$

O sinal em cada parêntese é negativo se o fator está incluído no efeito e positivo se caso não esteja. Após expandir (E-2) utilizando álgebra ordinária, substitue-se cada "1" por (1), que representa o experimento em que todos os fatores estão nos seus níveis baixos^[12]. Em termos das estimativas definidas em

(E-2), a eq.(E-1) toma a forma:

$$\hat{y}_{ijkl} = \bar{y} + \frac{1}{2} (A)i + \frac{1}{2} (B)j + \dots + \frac{1}{2} (ABCD)ijkl \quad (E-3)$$

onde $i, j, k, l = \pm 1$, dependendo de o fator correspondente estar em seu nível alto (+1) ou baixo (-1). O fator "1/2" foi introduzido porque, em (E-1), os efeitos correspondem a mudanças unitárias sobre os fatores, enquanto que os efeitos estimados em (E-2) se referem a uma mudança de duas unidades (de -1 para +1).

As diferenças entre os valores medidos e os estimados pela eq.(E-3) constituem os resíduos previstos no modelo (E-1) e, como já foi mencionado, eles devem ser NID (normal e independentemente distribuídos).

ii) Diagrama - Metade de Probabilidade Normal.

Não é usual incluir todas as parcelas de (E-3) na expressão para \hat{y}_{ijklm} . Aqueles efeitos que não se destacam das variações erráticas são utilizados na estimativa de ε_{ijklm} , aumentando o seu número de graus de liberdade. Nesta tese, essa escolha foi feita visualmente, através dos "diagramas - Metade de Probabilidade Normal" (Half Normal Probabilit plot), que aparecem em todas as análises.

iii) Anova (Tabela de Análise de Variância)

1) SUM OF SQUARES (SS):

-Model SS \propto soma dos quadrados dos desvios dos valores previstos pelo modelo, eq.(E-3), em relação à média.

-Error SS \propto soma dos quadrados dos desvios provocados por variações erráticas [calculados a partir dos ensaios repetidos e/ou efeitos ignorados em (ii)]

-C. Total SS \propto Soma dos desvios quadráticos dos valores medidos (tab.3.1) em relação à média desses valores.

-Variable (ou efect) SS \propto Variância dos valores utilizados no cálculo do efeito da referida variável ou interação.

2) MEAN SQUARES (MS):

$MS_X = XSS/DF_x$ = estimativa para a variância de X. DF_x é o número de graus de liberdade de X e XSS é a soma de quadrados para X.

3) ROOT MSE:

É uma medida da dispersão errática dos valores da resposta medida (= $[MSE]^{1/2}$ = erro padrão das medidas). É uma estimativa do termo de variações randômicas, ϵ_{ijklm} , na eq.(E-1). Seu número de graus de liberdade é determinado pelas escolhas feitas em (ii).

4) DEP. MEAN, INTERCEPT OU TOTAL AVERAGE:

É a media aritmética de todos os valores medidos.

5) C.V. (COEFICIENTE DE VARIAÇÃO):

Expressa a dispersão errática dos dados como um percentual da resposta média:

$$C.V. = \left(\frac{\text{ROOT MSE}}{\text{TOTAL AV}} \right) 100 \% \quad (E-4)$$

6) R.SQUARED:

Fornece a proporção da dispersão total dos dados explicada pelo modelo:

$$R^2 = \frac{\text{MODEL SS}}{\text{TORAL SS}} \quad (E-5)$$

7) PARAMETER ESTIMATE:

São estimativas para os termos do segundo membro da eq.(E-1). São iguais à metade de cada efeito definido na eq.(E-2).

8) STD ERROR (SE):

É o erro padrão associado com as estimativas dos parâmetros do segundo membro de (E-1). É igual à metade do erro padrão para os efeitos definidos na eq.(E-2), SE_{ef} , e tem

igual número de graus de liberdade:

$$SE = \frac{1}{2} (SE_{ef}) = \frac{1}{2} [V(ef)]^{1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{N} MSE \right)^{1/2} \quad (E-6)$$

onde $V(ef)$ é a variância errática para os efeitos dados pela eq.(E-2), N é o número total de experimentos (32) e MSE estima a variância errática das medidas realizadas.

9) t (FOR H_0 : PARAMETER = 0):

É o parâmetro de Student, utilizado para escolher uma das hipóteses:

$$H_0: \text{efeito} = 0 \quad (\text{hipótese nula})$$

$$H_1: \text{efeito} \neq 0$$

e é calculado através da fórmula:

$$t = \frac{\text{efeito} - 0}{\text{erro padrão estimado para os efeitos, admitindo-se } H_0}$$

$$= \frac{\text{efeito}}{\left(\frac{4}{N} MSE \right)^{1/2}} = \frac{\text{parameter estimate}}{\text{Std error}} \quad (E-7)$$

A quantidade:

$$\text{PROB.} > |t|$$

presente nas ANOVAS, é a probabilidade de, por pura chance, ocorrer um efeito tão distante de zero (H_0 : efeito = 0) quando o observado. O número de graus de liberdade da distribuição,

t, utilizada para avaliar esta probabilidade é igual ao da estimativa do erro padrão (SE), na eq.(E-6). Este teste é de "dupla cauda", pois avalia apenas se há algum efeito, sem considerar a direção que ele possa ocorrer.

iv) TABELA DE RESIDUOS.

Os resíduos são calculados a partir dos valores medidos para a resposta, Y_{ijklm} e das correspondentes previsões, y_{ijklm} , do modelo ajustado em (E-3):

$$\text{resíduo} = Y_{ijklm} - y_{ijklm} \quad (\text{E-8})$$

Os parâmetros, Standardized Residual, Crock's D e t Value têm todos a mesma função: detectar "outliers", que são resíduos exageradamente grandes. Devido à sua interpretação direta, utilizou-se, nas análises realizadas no capítulo 3, o "resíduo standard", que é definido por:

$$\begin{aligned} \text{Std. Res.} &= \frac{\text{resíduo}}{\text{erro padrão para os resíduos}} \\ &= \frac{\text{resíduo}}{[\sum(\text{res.})^2/N]^{1/2}} \quad (\text{E-9}) \end{aligned}$$

É usual^[12,19] considerar "outlier" todo resíduo para o qual tem-se:

$$\text{Std. Res.} > 3$$

v) ANÁLISE DE RESÍDUOS.

Para que se esteja seguro quanto à adequação do modelo escolhido para a análise, as seguintes requisitos devem ser observados sobre a distribuição dos resíduos sobre os diagramas apresentados:

1) DIAGRAMA DE PROBABILIDADE NORMAL:

Os resíduos devem se ajustar ao longo de uma reta. Pontos muito distantes da reta podem ser outliers.

2) RESÍDUOS PADRÃO VERSUS VALORES PREVISTOS PELO MODELO:

Este diagrama não deve evidenciar qualquer estrutura. Se algum padrão for aparente, ele indicará a existência de correlação entre os resíduos e o valor da resposta.

3) RESÍDUOS VERSUS ORDEM DE CORRIDA DOS ENSAIOS:

Se algum padrão for aparente, ele não invalidará a análise, mas será indicativo de que a precisão da mesma poderia ser melhorada pela redução do espalhamento errático das medidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ETTLINGER, L.A., QUEREMISSINOFF, P.N., QUELLETTE, R.P.,
NAINAN, T.D., **Eletrotecnology**. Michigan: Ann Arbor
Science, 1980. v.6.
- 2 FAUCHAIS, P. Utilisation industrielle actuelle e
potentielle des plasmas: synthèses, traitement des
poudres, traitements métallurgiques, traitements de
surface. **Revue Phys. Appl.**, n.15, p.1281-1301, 1980.
- 3 TALANDIER, F. **État de l'art dans la technique des
plasmas**. Paris: Électricité de France, 1982. 32p.
- 4 MOORE, T. The plasma torch: revolutionizing the foundry
fire. **EPRI Journal**, p.12-19, Oct.1986.
- 5 DROUET, M.G. La technologie des plasmas: potentiel
d'application au canada. **Revue Generale de L'Electricité**,
v.95, n.1, p.12-19, oct.1986.
- 6 KURRIHARA, K., SASAKI, K., KAWARADA, M. Diamond-film

synthesis using dc plasma jet cvd. *Fugitsu Sci. Tech. J.*, v.1, n.25, p.44-51, March 1989.

- 7 SHASHKOV, A. G., YAS'KO, O. I. Application of approximate similarity for correlating arc characteristics. *IEEE Transactions on Plasma Science*, PS-1, n.3, p.21-37, Sept.1973.
- 8 KASSABJI, F., FAUCHAIS, P. Les générateurs à plasma. *Revue Phys. Appl.*, n.16, p.549-577, 1981.
- 9 SHARP, J.J. *Hydraulic modeling*. London: Butterworth, 1981, Part 1.
- 10 FOX, R.W., McDONALD, A. T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 19__ . cap. 7.
- 11 BARBOSA, J. N. *Mecânica dos fluidos e hidráulica geral*. Porto: Porto Edit., 19__ . vol.1
- 12 BOX, G. E. P., HUNTER W. G., HUNTER J. S. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building*. New York: Wiley, 1978.
- 13 MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 2.ed. New York: Wiley, 1984.

- 14 PEARSON, J. B., CURSON, F. L. Aspects of energy transport in a vortex stabilized arc. *J. Appl. Phys.*, v.1, n.64, p.77-88, July 1988.
- 15 MAROTTA, A. Potência térmica dissipada no catodo de um maçarico de plasma a ar. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 3.: 1990: Itapema. *Anais. Itapema: UFSC, 1990. V.2, p.1143-1145.*
- 16 SOUSA, S.D.I. *Estudo das superfícies técnicas.* São Paulo: Nobel, 1980.
- 17 BUSNARDO-NETO, J., RODRIGUES, V.A., BÖCKELMANN, H.K., SAKANAKA, P.H. Characteristics of a 30kw plasma torch. In: ENERGY INDEPENDENCE CONFERENCE ON FUSION ENERGY AND PLASMA PHYSICS: 1987: Rio de Janeiro, Brazil. *Anais. Singapore: World Scientific, 1988, p.248-258.*
- 18 CUNHA, A. G. *Desenvolvimento de uma sonda de entalpia e aplicação ao maçarico de plasma.* Campinas: UNICAMP, IFGW, 1988. Tese (mestrado)-UNICAMP, Instituto de Física Gleb Wataghin.
- 19 BORCHARDT, I.G., GOMES, A.F. *Termometria termoelétrica: termopares.* 2.ed. Porto Alegre: Sagra, 1979.

- 20 ASTM. **Annual book of ASTM standards.** Philadelphia: ASTM, 1987. v.14.01, p.309.
- 21 KU, H. H. Notes on the use of propagation of error formulas. In:--- **Precision measurements and calibration: selected NBS papers on statistical concepts and procedures.** Washington: National Bureau of Standards, Feb.1969.p.331-341 (NBS special publication 300, v.1).
- 22 LAJOIE-MAZENC, C. **Designe of plasma torch power suplies.** EDF-Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série B, p.113-127, 1991.
- 23 LEE, T. H. **Physics and enginnering of high power switching devices.** Cambridge: MIT Press, 1975.