

TESE DEFENDIDA POR Carlos Henrique Quagliato Galvão
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 11/11/01
Roseana da Exaltação Trevisan
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Método para Medição do Diâmetro da Marca
Produzida pelo Feixe de Elétrons na Soldagem

Autor: **Carlos Henrique Quagliato Galvão**
Orientador: **Roseana da Exaltação Trevisan**

80/2001

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

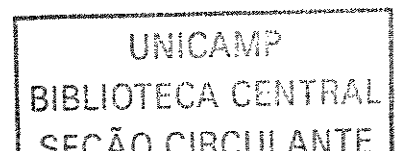
***Método para Medição do Diâmetro da Marca
Produzida pelo Feixe de Elétrons na Soldagem***

**Autor: Carlos Henrique Quagliato Galvão
Orientador: Roseana da Exaltação Trevisan**

**Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Fabricação**

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2001
S.P. – Brasil



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

G139m Galrão, Carlos Henrique Quagliato.
Método para medição do diâmetro da marca
produzida pelo feixe de elétrons na soldagem / Carlos
Henrique Quagliato Galrão.--Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Soldagem. 2. Feixes de elétrons – Medição. I.
Trevisan, Roseana da Exaltação. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

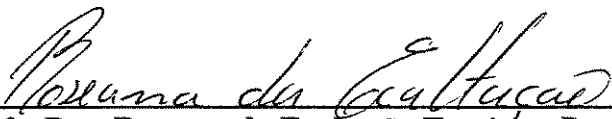
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***Método para Medição do Diâmetro da Marca
Produzida pelo Feixe de Elétrons na Soldagem***

Autor: Carlos Henrique Quagliato Galvão

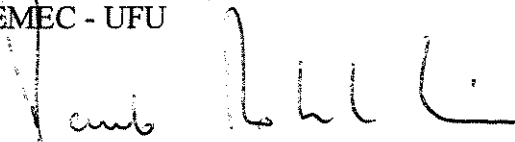
Orientador: Roseana da Exaltação Trevisan



**Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan, Presidente
DEF/FEM - UNICAMP**



**Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi
FEMEC - UFU**



**Prof. Dr. Paulo Roberto Mei
DEMA/FEM - UNICAMP**

Campinas, 11 de Novembro de 2001.

066666

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa Cláudia, aos meus filhos Bruna, André e Thiago, e a meus pais João (in memorian) e Dinorá.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e entidades às quais presto minha homenagem:

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Roseana da Exaltação Trevisan que me mostrou os caminhos a serem seguidos, e também pelo apoio, amizade, compreensão e oportunidade dada para a realização do trabalho.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, que deu todo o apoio necessário para que este trabalho fosse realizado.

Aos técnicos Luiz Carlos Rezende Monteiro e Carlos Alberto Berton pelo auxílio à realização dos ensaios, aos funcionários Benedito Almeida Costa, Augusto Dias Neto e Leandro Arruda Pinto pelo corte dos corpos de prova, e a todos os funcionários da Divisão de Fabricação, da Divisão de Informática e da OFMEQ do CTM-SP, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos Srs. Roberto Andraus e Adão Expedito Barbosa da Silva que cederam suas impressoras para a impressão deste trabalho.

A FAEP pelo auxílio financeiro.

*“Se não houve frutos, valeu a beleza das flores;
Se não houve flores, valeu a sombra das folhas;
Se não houve folhas, valeu a intenção da semente...”*
(Henfil)

Resumo

GALRÃO, Carlos Henrique Quagliato, *Método para Medição do Diâmetro da Marca Produzida pelo Feixe de Elétrons na Soldagem*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 99 p. Dissertação (Mestrado).

A soldagem por feixe de elétrons é uma técnica de soldagem especial, pela qual é possível obter cordões de solda com penetração maior que a obtida com os métodos convencionais. Os parâmetros de trabalho desta técnica desenvolvidos em um determinado equipamento, não podem ser utilizados em outro. Isto faz com que seja necessário uma série de tentativas para a definição dos parâmetros ideais, para se obter a morfologia de cordão desejada. A literatura aborda diversos métodos e técnicas para se reduzir este número de tentativas. O método mais simples, é o que mede o diâmetro do feixe de elétrons em um bloco de tungstênio, cujo valor é inserido em modelos matemáticos, que relacionam os parâmetros do equipamento com as propriedades físicas do material. Porém, esta mesma literatura não fornece informações detalhadas de como realizar a medida deste diâmetro. Este trabalho propõe um método para se medir o diâmetro do feixe de elétrons para ser utilizado nestes modelos matemáticos. Para a proposição deste método, são analisadas a influência do método/tempo de elevação de corrente de feixe, no valor do diâmetro do feixe de elétrons para quatro níveis de potência. Os resultados mostram que o método de elevação de corrente de feixe mais adequado, é o que combina a elevação gradual, seguida de uma estabilização no valor da corrente de feixe, e que deve ser medido o diâmetro interno da marca deixada pelo feixe de elétrons.

Palavras Chave: Soldagem por Feixe de Elétrons, Diâmetro do Feixe de Elétrons, Parâmetros

Abstract

GALRÃO, Carlos Henrique Quagliato, *Method to Measure the Diameter of the Mark Produced by Electron Beam Welding*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

Electron beam welding is a special welding technique, by which it is possible to obtain deeper bead penetration than through conventional methods. The work parameters used in this technique developed in a certain equipment can not be used in another one. As a consequence, a series of attempts is necessary to define the ideal work parameters to reach the desired bead morphology. The literature reports different methods and techniques used to decrease the number of attempts. The most simple method is the one that measures the beam diameter in a tungsten block. The measured diameter is then inserted in mathematical models relating machine parameters and the material physical properties. The literature does not report detailed information concerning on the procedures to carry on this measurements. The aim of this work is to propose a method to measure the electron beam diameter that can be used in such mathematical models. The influence of time/method to raise the beam current is examined for four different power levels. The results show that the best procedure it is to raise the beam current gradually, followed by a stabilization. The inside diameter is the correct diameter to be measured and used in the mathematical models.

Key Words: Electron Beam Welding, Beam Diameter, Parameters.

Índice

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xv
Nomenclatura.....	xvii
Capítulo 1 - Introdução e Objetivos do Trabalho.....	1
Capítulo 2 - Revisão da Literatura.....	4
2.1 - Funcionamento de uma Máquina de Solda por Feixe de Elétrons.....	6
2.2 - Parâmetros de Soldagem.....	8
2.3 - Penetração do Cordão de Solda.....	9
2.3.1 - Modelos Matemáticos.....	10
2.3.2 - Método numérico.....	16
2.3.3 - Métodos computacionais.....	18
2.3.4 - Resumo sobre os métodos para se prever a penetração do cordão e solda.....	21
2.4 - Técnicas para medição do diâmetro do feixe.....	22
2.4.1 - Arame rotativo.....	23
2.4.2 - Oscilação do feixe.....	25
2.4.3 - DIABEM - Sistema para Diagnóstico do Feixe.....	28
2.4.4 - Intensidade do brilho.....	34

2.4.5 - Resumo sobre as técnicas para medição do diâmetro do feixe de elétrons.....	35
Capítulo 3 - Procedimento Experimental.....	37
3.1 - Material utilizado.....	37
3.2 - Equipamento.....	38
3.3 - Realização dos ensaios.....	39
3.4 - Planejamento Estatístico.....	41
3.4.1 - Definição dos valores de tensão de aceleração e de corrente de feixe.....	42
3.4.2 - Definição dos valores de corrente de foco.....	43
3.4.3 - Formas de elevação da corrente de feixe.....	43
3.5 - Medidas do diâmetro do feixe.....	48
3.5.1 - Medidas preliminares com o uso de um projetor de perfil.....	48
3.5.2 - Medidas do diâmetro com o uso de um analisador de imagens.....	50
3.5.3 - Medidas do diâmetro após a retirada do material expelido do orifício com o uso de um analisador de imagens.....	51
Capítulo 4 - Resultados e Discussões.....	54
4.1 - Resultados Preliminares.....	54
4.1.1 - Análise visual.....	54
4.1.2 - Análise do comportamento do material expelido.....	60
4.2 - Resultados Finais.....	64
4.2.1 - Medição do diâmetro interno e externo do orifício com uso de um analisador de imagem.....	64
4.2.2 - Análise do diâmetro externo.....	69
4.2.3 - Análise do diâmetro interno.....	72
4.2.4 - Análise visual do diâmetro interno após retirada do excesso de material.....	78
4.2.5 - Análise dimensional do diâmetro interno após retirada do excesso de material.....	85
4.2.6 - Análise de variância do diâmetro após a retirada do excesso de material.....	92
4.2.7 - Proposição de um método para se medir o diâmetro do feixe de elétrons.....	93

Capítulo 5 - Conclusões	95
5.1 - Método proposto.....	95
5.2 - Formato do diâmetro do feixe.....	96
Capítulo 6 - Referências Bibliográficas	97

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Comparação entre os números de publicações sobre vários processos de soldagem. (Dixon, 1990).....	5
Figura 2.2 - Diagrama esquemático dos componentes de uma máquina de solda por feixe de elétrons. (Powers, 1997).....	7
Figura 2.3 - Comparação entre um cordão de solda TIG e um cordão EBW com mesmo valor de penetração. (Burgardt, 1992).....	7
Figura 2.4 - Representação esquemática de uma solda por feixe de elétrons. (Elmer et al., 1990).....	8
Figura 2.5 - Modelo do gradiente de temperatura no limite da área fundida na direção “R”. (Hashimoto & Matsuda, 1967).....	11
Figura 2.6 - Volume de controle para balanço de energia. (Lubin, 1968).....	13
Figura 2.7 - Modelo de transferência de calor em superfície de temperatura constante. (Tong & Giedt, 1971).....	14
Figura 2.8 - Modelo de transferência de calor. (Tong & Giedt, 1971).....	14
Figura 2.9 - Principais forças atuando na cavidade. (Tong & Giedt, 1971).....	14
Figura 2.10 - Esquema do modelo mostrando as coordenadas relativas do sistema. (Lambrakos et al., 1994).....	17
Figura 2.11 - Diagrama esquemático de um dispositivo de arames rotativos.(Dixon, 1990)	24
Figura 2.12 - Esquema completo de uma “Faraday Cup”. (Hicken et al., 1991).....	26
Figura 2.13a - Oscilação do feixe transversalmente a fenda.....	27
Figura 2.13b - Oscilação do feixe longitudinalmente a fenda.....	27

Figura 2.14a - Sinal obtido pela “Faraday Cup”. (Hicken et al., 1991).....	28
Figura 2.14 b - Sinal ampliado. (Hicken et al., 1991).....	28
Figura 2.15 - Diagrama esquemático do sistema de diagnóstico do feixe de elétrons. (Laflamme & Powers, 1991).....	29
Figura 2.16 - Diagrama esquemático dos sensores. (Laflamme & Powers, 1991).....	30
Figura 2.17 - Dados típicos obtidos com o uso do sensor de fenda.(Laflamme & Powers, 1991).....	32
Figura 2.18 - Distribuição de energia obtido com o uso do sistema de diagnóstico do feixe de elétrons. (Dilthey et al., 1997).....	32
Figura 2.19 - Distribuição de energia obtida com sensor de furo. (Dilthey et al., 1997).....	33
Figura 2.20 - Comparação da distribuição de energia de um feixe de mesma potência sem oscilação e com oscilação. (Dilthey et al., 1997).....	33
Figura 3.1 - Corpo de prova de tungstênio com diâmetro de 17,5 mm e 46 mm de comprimento.....	38
Figura 3.2 - Visão geral do equipamento de soldagem por feixe de elétrons.....	39
Figura 3.3 - Esquema de montagem dos corpos de prova para realização do ensaio.....	40
Figura 3.4 - Detalhe da montagem dos corpos de prova.....	41
Figura 3.5 - Formas de elevação da corrente de feixe.....	44
Figura 3.6 - Forma de elevação da corrente de feixe utilizada pelo “Método 3”.....	47
Figura 3.7 - Marcas típicas do feixe de elétrons sem expulsão de material e com expulsão de material, respectivamente.....	49
Figura 3.8 - Desenho esquemático do material expelido do orifício gerado pelo feixe de elétrons.....	49
Figura 3.9 - Definição do diâmetro interno do orifício.....	51
Figura 3.10 - Detalhe das direções de medição dos diâmetros externos e internos.....	51
Figura 3.11 - Corte transversal do orifício gerado pelo feixe de elétrons.....	52
Figura 3.12 - Foto de marca típica deixada pelo feixe de elétrons após retirada do material expelido do orifício.....	53
Figura 4.1 - Marca realizada por feixe de elétrons no corpo de prova 10.....	57

Figura 4.2 - Marca realizada por feixe de elétrons no corpo de prova 17.....	57
Figura 4.3 - Assimetria do feixe de elétrons em função da distância de trabalho. (Sandstrom et al., 1970).....	58
Figura 4.4 - Distribuição de energia dentro de um feixe de elétrons. (Powers & Laflamme, 1991).....	59
Figura 4.5 - Corte esquemático de um corpo de prova mostrando o orifício gerado pelo feixe de elétrons.....	60
Figura 4.6 - Altura “h” de material expelido do orifício em função do método de elevação de corrente de feixe e da potência do feixe.....	62
Figura 4.7 - Diâmetro “d” de material expelido do orifício em função do método de elevação de corrente de feixe e da potência do feixe.....	63
Figura 4.8 - Valores médios dos diâmetros externos (em milímetros) em função das condições de ensaio e da potência utilizada.....	69
Figura 4.9 - Valores médios dos diâmetros internos (em milímetros) em função das condições de ensaio e da potência utilizada.....	73
Figura 4.10 - Diâmetro interno em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração para o Método 1.....	75
Figura 4.11 - Diâmetro interno em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração para o Método 2.....	75
Figura 4.12 - Diâmetro interno em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração para o Método 3.....	76
Figura 4.13 - Diâmetro do feixe em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração. (Sandstrom et al., 1970).....	77
Figura 4.14a - Comportamento do diâmetro do feixe de elétrons em função da potência e método utilizado, considerando o diâmetro externo das marcas na condição de $I=10$ mA e $T=110$ kV.....	86
Figura 4.14b Comportamento do diâmetro do feixe de elétrons em função da potência e método utilizado, considerando o diâmetro externo das marcas na condição de $I=10$ mA e $T=110$ kV.....	87

Figura 4.15 - Valores médios de diâmetro em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe para o Método 1.....	90
Figura 4.16 - Valores médios de diâmetro em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe para o Método 2.....	90
Figura 4.17 - Valores médios de diâmetro em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe para o Método 3.....	91

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Energias envolvidas em função das potências e dos métodos utilizados.....	48
Tabela 3.2 - Tabela com valores de tensão, corrente de feixe, método de elevação de corrente de feixe e sequência de ensaio utilizados.....	48
Tabela 4.1 - Marcas do feixe de elétrons nos corpos de prova.....	55
Tabela 4.2 - Medidas do material expulso do orifício gerado pelo feixe de elétrons, medidos com projetor de perfil para corpos de prova ensaiados com corrente de feixe de 50 mA.....	61
Tabela 4.3 - Valores médios dos diâmetros internos e externos obtidos de cada corpo de prova em função das condições de ensaio.....	65
Tabela 4.4 - Valores médios dos diâmetros internos “di” e externos “de”, e da variância (entre parenteses) em função das condições de ensaio.....	66
Tabela 4.5 - Comparação entre os valores médio dos diâmetros externos utilizando um projetor de perfil e um analisador de imagem.....	72
Tabela 4.6 - Marcas do feixe de elétrons nos corpos de prova após retirada do excesso de material.....	79
Tabela 4.7 - Comparação entre as marcas deixadas pelo feixe de elétrons antes e depois da retirada do excesso de material.....	81
Tabela 4.8a - Valores médios de diâmetro para cada corpo de prova e para condição de ensaio, considerando o diâmetro externo das marcas na condição de $I=10\text{ mA}$ e $T=110\text{ kV}$	86

Tabela 4.8b - Valores médios de diâmetro para cada corpo de prova e para condição de ensaio, considerando o diâmetro interno das marcas na condição de $I=10\text{ mA}$ e $T=110\text{ kV}$	87
Tabela 4.9 - Variância entre os valores médios de diâmetro para cada corpo de prova e para condição de ensaio.....	92

Nomenclatura

Letras Latinas

- a – Raio da cavidade formada pelo feixe de elétrons
- C – Calor específico
- d – Diâmetro da marca deixada pelo feixe de elétrons
- D – Penetração do cordão de solda
- h – Altura do material expelido da marca do feixe de elétrons
- H – Calor latente de fusão
- I – Corrente de feixe
- k – Condutividade térmica
- L – Comprimento da poça de fusão
- m - Constante retirada através de ajuste de curva de gráfico experimental
- r – Distância radial
- R – Gradiente de temperatura
- s - Segundos
- T – Tensão de aceleração
- v – Velocidade de soldagem
- W – Largura do cordão de solda

Letras Gregas

α – Difusividade térmica

ϕ – Diâmetro do feixe de elétrons

ρ – Densidade

” - Polegada

° - Graus

Ω – Ohms

π – Pi

μ_s –Micro-segundo

Abreviações

a1, a2, a3, a4, a5 – Fatores de correção adimensionais

C1 – Constante retirada através de ajuste de curva de gráfico experimental

cm -Centímetro

De – Diâmetro externo da marca deixada pelo feixe de elétrons

Di – Diâmetro interno da marca deixada pelo feixe de elétrons

EBW – Electron Beam Welding;

E_{in} – Energia introduzida pelo feixe de elétrons

E_o - Densidade média de energia

E_o* - Densidade média de energia crítica

H_{sg} – Calor latente de sublimação

Hz – Hertz

I_f – Corrente de foco

I_o – Valor nominal da corrente de feixe

J - Joule

kg/mm³ – Kilograma por milímetro cúbico

kJ – Kilo-Joule
kV – Kilo-Volts
kW – Kilo-Watts
 L_1 – Distância da peça a ser soldada em relação ao canhão de elétrons
mA – Mili-ampère
mbar – Mili-bar
mm – Milímetro
 P_o – Densidade média de potência
 q_c – Energia perdida por convecção
 $Q_{\text{condução}}$ – Taxa de transferência de calor por condução
 q_h – Variação de entalpia
 q_o – Potência do feixe
 q_r – Energia perdida por radiação
rpm – Rotações por minuto
 t' – Tempo de subida da corrente de feixe
 t_i – Tempo infinitesimal de subida da corrente de feixe
TIG – Tungsten Inert Gas,
 T_m – Temperatura média de fusão
 T_n – Temperatura de fusão na superfície
 t_o – Tempo de permanência do feixe de elétrons
 T_o – Temperatura da peça antes da soldagem
 $t(p)$ – Espessura de chapa
 T_s – Temperatura de sublimação
 W/mm^2 - Watts por milímetro quadrado

Capítulo 1

Introdução e Objetivos do Trabalho

O rápido desenvolvimento tecnológico que está ocorrendo nos dias de hoje, exige que os processos de fabricação apresentem um alto desempenho, seja ele, relativo a qualidade, aos custos, aos recursos disponíveis ou ao volume de produção. A soldagem por feixe de elétrons (EBW), é um processo de soldagem que apresenta um desempenho muito superior a qualquer outro processo de soldagem existente.

Soldas realizadas por este processo (EBW) consomem baixos valores de energia de soldagem, da ordem de 200 J/mm, e por isso, geram uma menor zona termicamente afetada. Além disso, devido a geometria estreita do cordão de solda, gera-se uma solidificação mais rápida com um menor tamanho de grão. A EBW é normalmente realizada em ambientes de alto vácuo, reduzindo os problemas de oxidação e contaminação da poça de fusão. Na maioria dos casos, as alterações das propriedades do material neste processo, são bem menores que as geradas por outros processos de fusão.

Outra propriedade importante deste processo, é que mesmo soldas que apresentam grande penetração, são adequadas para aplicações de montagem de grande precisão. Uma montagem de precisão necessita que as dimensões finais da peça possuam alta reprodutibilidade. A reprodutibilidade dimensional é afetada pelas distorções que aparecem na peça soldada. Esta

distorção ocorre porque o material é fundido e solidificado, sendo posteriormente resfriado e contraído. Desta forma, a solda EBW é ideal também para se obter pequenas distorções da peça.

A soldagem por feixe de elétrons produz soldas equivalentes, ou superiores as produzidas por outros processos de soldagem por fusão. Sua grande limitação é a alta complexidade, o alto custo do equipamento, o tamanho limitado da câmara de vácuo, e a sua dificuldade em ser portátil para aplicações em campo. As principais aplicações da EBW estão nas áreas onde boas propriedades do material soldado, e pequenas distorções são essenciais ao processo. Este processo é utilizado nas mais diversas indústrias do mundo, em áreas onde a alta tecnologia de fabricação se faz necessária, como: soldagem de materiais dissimilares, indústrias nuclear, aeroespacial, aeronáutica, automotiva, instrumentação, médica, eletrônica comercial e de campo.

O custo de aquisição de uma máquina de soldagem por feixe de elétrons, gira em torno de US\$ 700.000,00 (setecentos mil dólares), para um equipamento simples com poucos recursos, podendo chegar até US\$ 4.500.000,00 (quatro milhões e quinhentos mil dólares) para equipamentos bastantes complexos. No Brasil existem em torno de 05 (cinco) equipamentos de soldagem por feixe de elétrons instalados.

Como pode ser visto, os custos envolvidos neste processo são altos, sejam eles relacionados a aquisição ou a operação do equipamento. Além disso, uma das principais características deste processo de soldagem, é que para se alcançar uma solda com penetração e largura do cordão desejados, são necessárias várias tentativas até se atingir a morfologia desejada. Este processo de tentativas é responsável pela geração de parte destes custos, já que quanto maior for o número de tentativas realizadas, maior será o custo gerado. Este fato ocorre porque, os parâmetros desenvolvidos em um certo equipamento, não podem ser utilizados por outro. Caso isto seja feito, não é possível obter uma mesma morfologia do cordão de solda, pois ela é influenciada tanto pelo comportamento do foco do feixe de elétrons (Galvão & Trevisan, 1999 b), como também pela densidade de potência e densidade média de energia do feixe, que estão diretamente relacionados com o diâmetro do feixe de elétrons, conforme também demonstrado por Galvão & Trevisan (1999 a). A variação do diâmetro do feixe que ocorre entre equipamentos distintos, está ligada ao

sistema de construção utilizado. Os fatores que influenciam este tipo de comportamento são as diferenças existentes no desenho do canhão de elétrons, no sistema de bobinas de controle do feixe, no sistema ótico, na distância do canhão a peça, e também no nível de vácuo da câmara de soldagem. Todos estes fatores fazem com que o diâmetro do feixe de elétrons seja diferente de um equipamento para outro, mesmo que sejam utilizados os mesmos valores de tensão de aceleração, corrente de feixe, corrente de foco, e distância do canhão à peça.

Desta forma, o conhecimento do comportamento do diâmetro do feixe de elétrons em função dos parâmetros do equipamento utilizado, permite que se obtenha um cordão de solda com uma determinada morfologia que atenda as especificações de projeto, com um número menor de tentativas. Como consequência, o desenvolvimento do processo de soldagem será realizado de maneira mais rápida e eficiente.

Baseado no exposto, o principal objetivo deste trabalho é o de propor um método para se medir o diâmetro da marca produzida pelo feixe de elétrons, que possa ser utilizado nos modelos matemáticos existentes para calcular a penetração do cordão de solda. Este método deve apresentar uma facilidade e simplicidade de uso, que permita que o mesmo seja utilizado em um ambiente de produção. Para propor este método, analisou-se o comportamento do diâmetro das marcas deixadas pelo feixe de elétrons em blocos de tungstênio, utilizando como variáveis de influência a corrente de feixe, a tensão de aceleração e o método de elevação de corrente de feixe.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Neste capítulo é apresentada uma revisão das técnicas existentes para se prever a penetração do cordão de solda realizado pelo processo de soldagem por feixe de elétrons. Ainda neste capítulo são apresentados os métodos desenvolvidos para se medir o diâmetro do feixe de elétrons, utilizados por algumas destas técnicas, visando reduzir o tempo do processo de levantamento de parâmetros de soldagem para se atingir a penetração desejada.

Para a realização desta revisão de literatura, foram utilizadas as bases de dados: COMPENDEX, e METADEX entre os anos de 1989 à 2000, disponíveis na Biblioteca da Área de Engenharia (BAE) da UNICAMP. Para se chegar aos artigos de interesse, utilizou-se como estratégia de busca, as palavras chaves: “*Electron Beam*”, “*Welding*” e “*Parameters*”. Primeiro utilizou-se apenas a palavra chave “*Electron Beam*”, refinando posteriormente a pesquisa com a inclusão, na sequência, das palavras “*Welding*” e “*Parameters*”.

Com esta estratégia de busca foram recuperados cerca de 106 títulos de documentos, sendo 37 títulos da base Compendex e 69 títulos da base Metadex. Dentre todos estes títulos, apenas 14 (catorze) continham informações à respeito das técnicas de previsão de penetração do cordão de solda, bem como sobre métodos para se medir o diâmetro do feixe de elétrons, que pudessem ser utilizados neste trabalho. Os outros títulos listados na referência bibliográfica foram retirados dentro das referências destes poucos títulos. Consultou-se também a base de dados ACERVUS,

que contém dissertações de mestrado e teses de doutorado publicadas em português, no entanto nenhum título de documento foi recuperado nesta base de dados.

A presença de pouca informação a respeito destas técnicas e destes métodos, é explicado em parte pela figura 2.1 apresentada por Dixon (1990), onde o autor apresenta um gráfico que compara o número de publicações na área de soldagem em geral com os processos de soldagem por arco elétrico, por laser e por feixe de elétrons, encontrados na base de dados WELDASEARCH. Pode-se ver nesta figura que tanto o número de publicações na área de soldagem em geral (~ 62.000 publicações), como sobre os processos de soldagem a arco (~ 24.000 publicações), são muito maiores que o número de publicações sobre soldagem por feixe de elétrons (~ 4.000 publicações), e também sobre solda a laser (~ 1.500 publicações). Em termos percentuais, o número de publicações sobre soldagem por feixe de elétrons representa apenas 4,4% das publicações sobre soldagem, enquanto que o número de publicações sobre o processo de soldagem por arco elétrico representa 26,2 %.

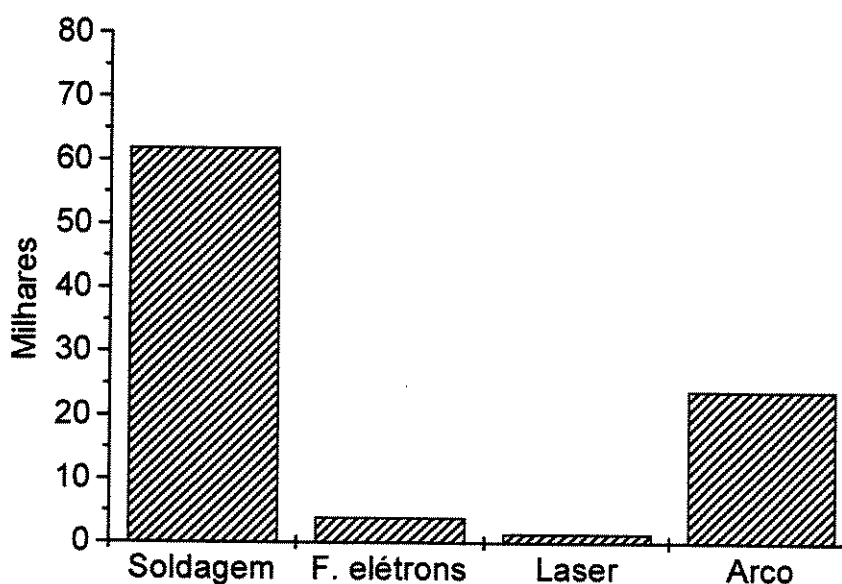


Figura 2.1 - Comparação entre os números de publicações sobre vários processos de soldagem.
(Dixon, 1990).

2.1 Funcionamento de uma Máquina de Solda por Feixe de Elétrons

Segundo ANDREWS HI-TEC CORPORATION (1998), a soldagem por feixe de elétrons surgiu no final dos anos 50, acidentalmente nos laboratórios da Companhia Carl Zeiss de Stuttgart, durante a realização de um experimento para aumentar a potência de um microscópio eletrônico para a análise de uma amostra. Para a sua surpresa, a amostra do material que estava sendo analisada havia desaparecido após o experimento. Mais tarde, esta empresa descobriu que pela regulação da potência do feixe, uma peça poderia fundir e solidificar novamente.

Electron Beam Welding (EBW) é um processo de fusão com alta densidade energética que é conseguido pelo bombardeamento da junta a ser soldada com um feixe intenso (fortemente focado) de elétrons, que são acelerados à velocidades entre 0,3 à 0,7 vezes a velocidade da luz através de uma diferença de potencial entre 25 a 200 kV. A fig. 2.2, mostra esquematicamente um canhão de elétrons com seus diversos componentes. A conversão da energia cinética dos elétrons gerados no canhão em energia térmica é instantânea. Quando os elétrons acelerados atingem e penetram na peça a ser soldada, é produzido a fusão da superfície. Esta fonte de energia pode ser usada para soldar qualquer metal que pode ser soldado por arco elétrico.

Como toda energia cinética dos elétrons pode ser concentrada em uma pequena área da peça, é possível obter-se densidades de potência da ordem de 10^5 W/mm². Com os processos convencionais de soldagem a densidade de energia possível de ser obtida é da ordem de 10^2 W/mm². Este valor é maior que o possível com qualquer outro feixe contínuo, incluindo o feixe de laser. A alta densidade de potência mais a penetração intrínseca muito pequena dos elétrons em uma peça sólida resulta em uma fusão e vaporização local quase que instantânea do material. Esta característica distingue a Solda por Feixe de Elétrons dos outros métodos de soldagem, nos quais a taxa de fusão é limitada pela condução térmica. Para se ter uma idéia da capacidade do processo de soldagem por feixe de elétrons em gerar cordões com pequena largura e alta penetração, a figura 2.3 mostra de forma esquemática uma comparação entre a morfologia típica de uma solda TIG e uma EBW, para um mesmo valor de penetração, onde pode se notar o formato praticamente cônico e a pequena área de fusão da solda EBW, em relação a TIG.

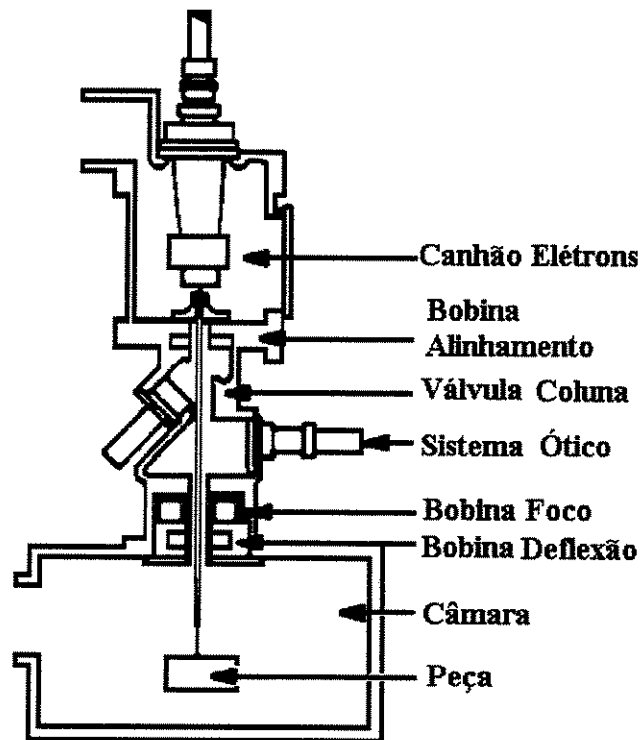


Figura 2.2 - Diagrama esquemático dos componentes de uma máquina de solda por feixe de elétrons. (Powers, 1997).

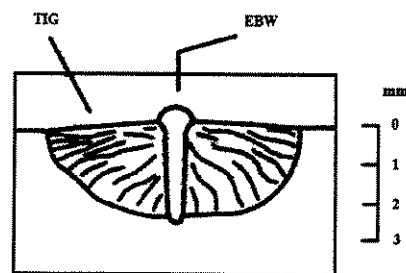


Figura 2.3 - Comparação entre um cordão de solda TIG e um cordão EBW com mesmo valor de penetração. (Burgardt, 1992).

A formação do cordão de solda por feixe de elétrons é apresentada esquematicamente na figura 2.4, que mostra um feixe de elétrons movendo-se com velocidade “ v ”. Como toda a sua energia está concentrada em uma pequena área de diâmetro “ ϕ ”, forma-se uma cavidade devido a vaporização do material que está sendo soldado, que permite que este feixe atinja regiões

profundas na peça, gerando um cordão de solda com penetração “D”, largura “W”, e uma poça de fusão de comprimento “L”.

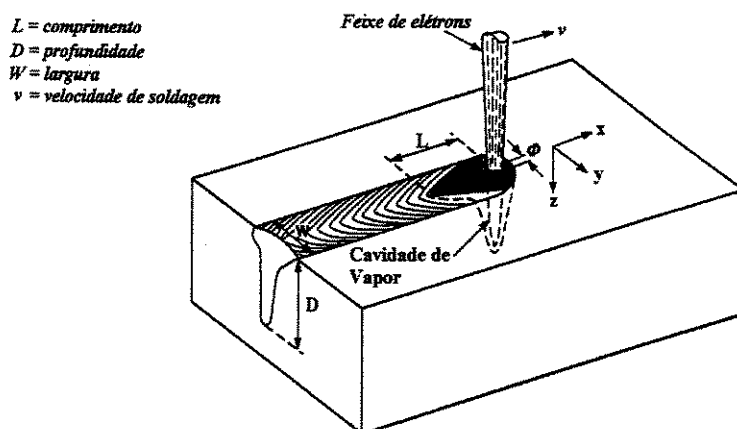


Figura 2.4 - Representação esquemática de uma solda por feixe de elétrons. (Elmer et al., 1990).

2.2 Parâmetros de Soldagem

Como em todo processo de soldagem, para se usar uma Máquina de Solda por Feixe de Elétrons, é necessário que os parâmetros sejam ajustados para se obter a morfologia do cordão desejada. Os parâmetros mais importantes deste tipo de equipamento são:

■ *Voltagem de aceleração*: a voltagem de aceleração é a voltagem entre o cátodo e o ânodo, e é ela que determina a velocidade dos elétrons. A voltagem de aceleração normal em um canhão de elétrons está entre 60 e 150 kV. Segundo Dixon (1990), atualmente existem equipamentos que possuem tensão de trabalho de 200 kV. A velocidade dos elétrons determina o quanto os elétrons podem penetrar dentro da peça a ser soldada e o formato do cordão de solda.

■ *Corrente do feixe de elétrons* : a passagem da corrente do feixe de elétrons pelo cátodo faz com que este se aqueça, permitindo que ocorra a emissão dos elétrons. Quanto maior a corrente de feixe, maior será a quantidade de elétrons no feixe.

■ *Velocidade de soldagem* : A velocidade de soldagem é controlada pelo sistema de movimentação da peça sob o feixe de elétrons. Normalmente, neste processo de soldagem o feixe de elétrons é fixo, e é a peça que move em conjunto com a mesa. Com uma velocidade de soldagem mais alta é possível produzir um cordão de solda muito estreito.

■ *Corrente de Foco*: O foco do feixe é feito pelo ajuste de lentes focais eletromagnéticas. O ajuste do foco permite alcançar altas densidades de potências (10^5 W/mm^2) permitindo obter soldas com grande penetração e pequena largura. Normalmente se usa o foco abaixo da linha de superfície da peça.

■ *Oscilação do Feixe (Deflexão)* : O sistema de oscilação permite oscilar o feixe em várias frequências, funções (circular, oval, etc.) e amplitudes. A oscilação influencia a forma e aumenta o canal de vapor do cordão durante o processo de soldagem. Uma oscilação correta pode evitar a formação de bolhas no cordão de solda.

2.3 Penetração do Cordão de Solda

A soldagem por feixe de elétrons é utilizada em várias aplicações, mas uma das suas principais aplicações ocorre quando há a necessidade de se obter um cordão de solda com grande penetração, realizado em um único passe. No entanto, como já descrito no capítulo 1, os parâmetros desenvolvidos em um determinado equipamento não podem ser transferidos para outro. Assim, sempre que houver a necessidade de se soldar um material qualquer, com uma determinada junta, será necessário realizar uma série de ensaios para se determinar o conjunto de parâmetros (tensão de aceleração, corrente de feixe, velocidade de soldagem) que permitirá atingir a penetração desejada. Para realizar estes ensaios é necessário definir um conjunto de parâmetros preliminares, cortar a junta da solda para verificar o resultado obtido, refinar os parâmetros, cortar novamente a junta, analisar o resultado, se necessário refinar novamente o conjunto de parâmetros e assim sucessivamente até se obter a penetração desejada. Como pode-se ver, o processo de levantamento de parâmetros de soldagem é demorado. Com a finalidade de

diminuir o número de tentativas para se atingir os parâmetros de soldagem, e consequentemente, diminuir o tempo e o custo deste processo, diversos pesquisadores vem tentando ao longo do tempo desenvolver técnicas que permitam reduzir o processo de desenvolvimento de parâmetros de soldagem. As técnicas encontradas na literatura foram agrupadas neste trabalho em: modelos matemáticos, métodos numéricos e métodos computacionais.

Os esforços dos pesquisadores no sentido de diminuir o tempo do processo de desenvolvimento de parâmetros de soldagem por feixe de elétrons, pode ser vista no trabalho publicado por Diltney & Weiser (1997), onde os autores descrevem os resultados de um programa de pesquisa europeu, cujo objetivo principal foi o de determinar a interação entre as características da peça e as características do feixe de elétrons durante o processo de soldagem, envolvendo um total de 12 máquinas de soldagem por feixe de elétrons com características diferentes (tensões entre 40 e 150 kV, potência entre 3 a 100 kW), em colaboração com institutos de pesquisa e empresas da área industrial de toda a Europa.

2.3.1 Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos foram desenvolvidos para prever a penetração do cordão de solda, através do correlacionamento entre os parâmetros do equipamento (tensão de aceleração, corrente de feixe e velocidade de soldagem) com as propriedades físicas do material (densidade, condutividade térmica, calor latente de fusão, etc.), além de um terceiro fator, que é o valor do diâmetro do feixe.

Um dos primeiros trabalhos encontrado para prever a penetração do cordão de solda em função dos parâmetros do equipamento, e das propriedades físicas do material, foi o de Hashimoto & Matsuda (1967). Esses autores consideraram em seu modelo o gradiente de temperatura no limite da área fundida na direção “R”, a espessura da chapa “t(p)”, o diâmetro do feixe “ ϕ ” e a velocidade de soldagem “v”, conforme representado na figura 2.5, e propuseram a seguinte equação para prever a penetração do cordão:

$$\frac{TI}{v} = 2.1D\phi(C\rho T_m + H) \left(1 + 5k \left(\frac{1}{\phi} + \frac{v}{2\alpha} \right) \frac{T_m}{C\rho T_m + H} \frac{1}{v} \right) \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde:

C= Calor Específico em (Cal/g°C)

T= Tensão em (Volts)

ρ = densidade em (g/cm³)

I= Corrente em (A)

T_m= Temperatura média de fusão em (°C)

v= Velocidade da solda em (mm/s)

H= Calor latente de fusão em (Cal/cm³)

ϕ = Diâmetro do feixe em (mm).

k= Condutividade térmica em (Cal/cm°Cs)

D= Penetração em (mm).

α = difusividade térmica em (mm²/s)

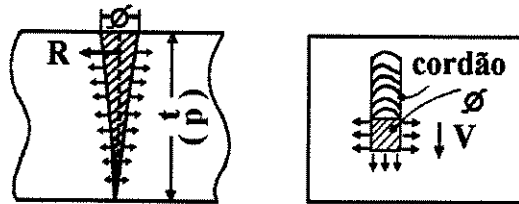


Figura 2.5 - Modelo do gradiente de temperatura no limite da área fundida na direção “R”.

(Hashimoto & Matsuda, 1967).

Ainda com o intuito de se prever a penetração da solda, Lubin (1968) realizou um estudo considerando o balanço de energia que ocorre durante o processo de soldagem do material. O autor assumiu que o feixe de elétrons é estacionário, e que o material se movimenta com velocidade “v”. O volume de controle criado ao redor do material fundido para se fazer o balanço de energia, é apresentado na figura 2.6. Nesta figura q₀ é a potência do feixe, q_H é a variação da entalpia necessária para realizar a penetração, q_R é a energia perdida por radiação e q_C é a energia perdida por convecção. Através da análise do balanço de energia, e considerando que a soldagem ocorre de duas formas: somente fusão e fusão juntamente com sublimação do material. O autor propôs duas equações para representar o processo de soldagem: equação 2.2a (fusão), e equação

2.2b (fusão e sublimação). O autor considerou que ocorre sublimação do material, por achar que esta seria a única maneira de se obter altos valores de penetração.

As duas equações propostas são:

$$\frac{4kDT_s}{TI} \left(\frac{H_{sg}}{CT_s} \right) \left(\frac{v\phi}{4\alpha} \right) = 1.0 \quad \text{Eq. (2.2a)}$$

$$\frac{4kDT_s}{TI} \left(\frac{H_{sg}}{CT_s} \right) \left(\frac{v\phi}{4\alpha} \right) \left[1 + \frac{\pi/2}{H_{sg}/CT_s} \frac{4\alpha/v\phi}{\ln(8\alpha/v\phi)} \right] = 1.0 \quad \text{Eq. (2.2b)}$$

Onde:

C= Calor Específico

T= Tensão

T_s= Temperatura de sublimação

I= Corrente

H_{sg}= Calor latente de sublimação

v= Velocidade da solda

k= Condutividade térmica

Ø= Diâmetro do feixe

α= difusividade térmica

D= Penetração

Obs.: Neste trabalho o autor não menciona o sistema de unidades adotado.

Lubin (1968) menciona ainda que a equação 2.2a deve ser usada quando o parâmetro definido como ($v\phi/4\alpha$) for maior que 1,0 (processo de soldagem rápido), e a que a equação 2.2b deve ser usada quando o parâmetro ($v\phi/4\alpha$) for menor que 0,05. No entanto, o autor não informa qual a equação que deve ser utilizada quando o mesmo parâmetro possuir um valor intermediário.

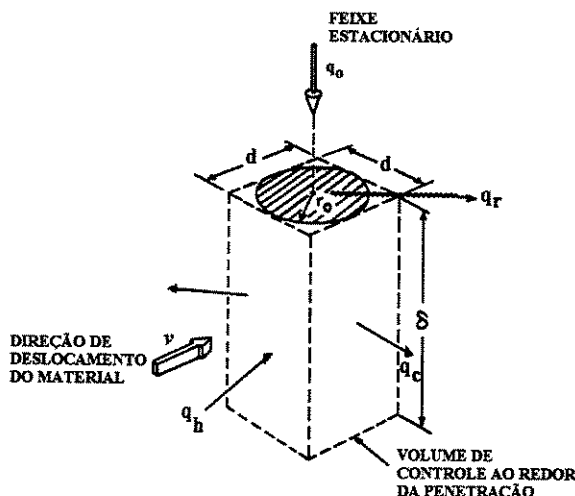


Figura 2.6 - Volume de controle para balanço de energia. (Lubin, 1968).

Tong & Giedt (1971) criaram um modelo analítico, considerando que a superfície de temperatura constante, tem uma forma cilíndrica, e que se move a velocidade “ v ”, conforme mostrado na figura 2.7, onde “ D ” é a penetração na coordenada “ x ”, “ a ” é o raio da cavidade formada e “ r ” é a distância radial. Como na realidade esta superfície apresenta formato cilíndrico apenas na parte frontal da solda e a face de trás não é bem definida, e depende de várias condições de soldagem, apenas a parte frontal do cilindro foi considerada, conforme mostrado pela figura 2.8, onde “ E_{in} ” é a energia introduzida pelo feixe, “ $Q_{condução}$ ” é a taxa de transferência de calor por condução, “ T_m ” é a temperatura de fusão em equilíbrio e “ T_n ” é a temperatura de fusão da superfície.

Estes autores consideraram também outros aspectos do processo como: pressão de vapor, tensão superficial e a força hidrostática que atuam neste volume durante o processo de soldagem, conforme mostrado na figura 2.9. Como resultado desta análise, apresentaram a Eq. (2.3). Segundo os autores, os valores obtidos com este modelo estariam de acordo com dados experimentais dentro de $\pm 20 \%$.

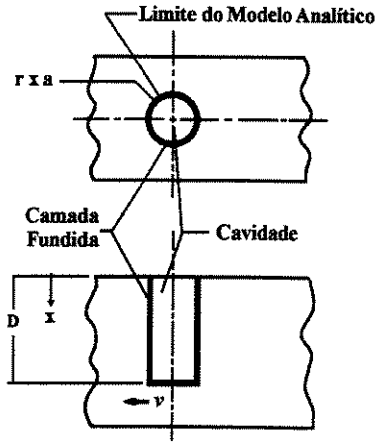


Figura 2.7 - Modelo de transferência de calor em superfície de temperatura constante.
(Tong & Giedt, 1971).

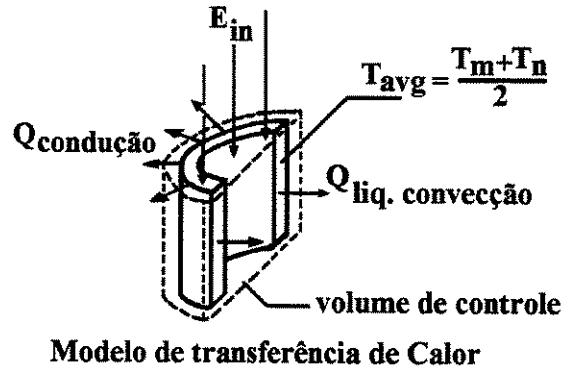


Figura 2.8 - Modelo de transferência de calor.
(Tong & Giedt, 1971).

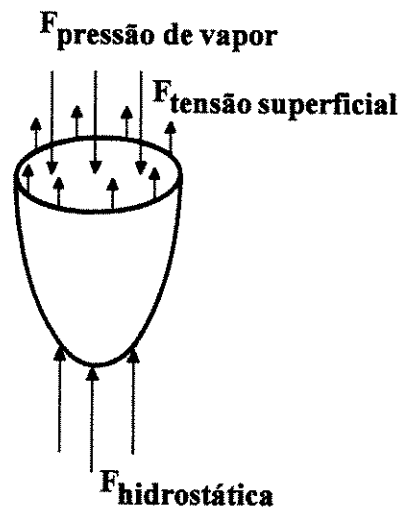


Figura 2.9 - Principais forças atuando na cavidade. (Tong & Giedt, 1971).

$$D = \frac{1}{2.1} \frac{\pi I}{v \phi} \left[\frac{1}{\rho C T_m + \rho H} \right] \left[\frac{1}{1 + 2.5 \frac{k}{\alpha} + 5 \frac{k}{v \phi}} \right] \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Onde:

C= Calor Específico

T= Tensão

ρ = densidade

I= Corrente

T_m = Temperatura média de fusão

v= Velocidade da solda

H= Calor latente de fusão

$\varnothing$ = Diâmetro do feixe

k= Condutividade térmica

D= Penetração

α = difusividade térmica

Obs.: Neste trabalho o autor também não menciona o sistema de unidades adotado.

Elmer & Giedt & Eagar (1990) apresentam um dos trabalhos mais completos referentes a previsão da penetração de uma solda por feixe de elétrons. Para que se possa representar qualquer material e prever qualquer penetração da solda, os autores propõe que sejam utilizados três fontes diferentes de introdução de calor na peça: fonte de calor distribuída (Eq. 2.4a), fonte de calor pontual (Eq. 2.4b) e fonte de calor linear (Eq. 2.4c). O parâmetro que norteia a escolha de qual tipo de fonte de calor deve ser usada é o da Densidade Média de Energia ($E_0 = TI/\phi y$).

Definiu-se um valor de Densidade Média de Energia Crítica (E_0^*) para o aço inoxidável 304 como sendo 10 J/ mm^2 , e de 6 J/ mm^2 para uma liga de alumínio 2024. Este valor de Densidade Média de Energia Crítica (E_0^*) representa a região de transição de um tipo de distribuição de calor para outra. Assim, para valores de Densidade de Energia menor que este valor, as soldas podem ser simuladas como uma fonte de calor distribuída, isto fará com que o cordão de solda apresente uma relação $D/(W/2) < 1$ (D = penetração e W = largura), onde a penetração depende principalmente de E_0 , ou seja, soldas realizadas com esta Densidade de Energia comportam-se como soldas realizadas por outros processos.

Para Densidades de Energia acima deste valor crítico (E_0^*), as soldas podem ser simuladas por: 1) alta densidade de potência do feixe, onde a relação $D/(W/2) > 1$; ou 2) fonte de calor pontual, onde a relação $D/(W/2) \cong 1$. No regime de alta densidade de potência a profundidade de penetração depende de E_0 e de P_0 [$P_0 = (TxI)/(\pi \phi^2/4)$].

$$D = \left(\frac{1}{2.43} \right) \left(\frac{1}{\rho C(T_m - T_o) + H} \right) \left(\frac{TI}{\phi v} \right) \quad \text{Eq. (2.4a)}$$

$$D = \left(\frac{1}{C1} \right) \left(\frac{TI/\phi v}{\rho C(T_m - T_o) + H} \right)^m \quad \text{Eq. (2.4b)}$$

$$D = \left(\frac{1}{5.3} \right) \left(\frac{\alpha^{0.625}}{k(T_m - T_o)} \right) \left(\frac{TI}{(v\phi)^{0.625}} \right) \quad \text{Eq. (2.4c)}$$

Onde:

C= Calor Específico em (J/g K)

T= Tensão em (Volts)

ρ = densidade em (g/mm³)

I= Corrente em (A)

T_m= Temperatura média de fusão em (K)

v= Velocidade da solda em (mm/s)

T_o= Temperatura da peça antes da soldagem (K)

ϕ = Diâmetro do feixe em (mm).

H= Calor latente de fusão em (J/mm³)

D= Penetração em (mm).

k= Condutividade térmica em (W/mm K)

W= Largura do cordão de solda em (mm).

α = difusividade térmica em (mm²/s)

C1, m, 5,3 e 0,625 foram retirados através de ajuste de curva dos gráficos experimentais obtidos pelos autores.

2.3.2 Método numérico

Na literatura o único método numérico encontrado para se determinar a penetração do cordão, foi o método desenvolvido por Lambrakos et al. (1994). Este modelo calcula os campos de temperatura e de velocidade em uma peça tridimensional, quando sofre um processo de

soldagem com grande penetração, e considera que as propriedades físicas do aço AISI 304 são funções da temperatura.

Além disso, este estudo introduz duas novas abordagens que são gerais e que contribuem para a análise quantitativa de soldas com grande penetração. Estas abordagens são baseadas na inclusão de dados experimentais referentes a geometria do orifício e da poça de fusão no modelo via restrições, e da dedução da forma efetiva do orifício, através do processo de mapeamento inverso. Este mapeamento inverso ajusta áreas da superfície do orifício, de acordo com dados experimentais relativos a forma da superfície de solidificação.

Para a construção do modelo físico do sistema foi considerado o transporte instável de energia e de momento em um sistema de coordenadas que se move junto com o feixe de elétrons, como mostrado na figura 2.10. Os limites do sistema são definidos pelas laterais de um segmento retangular de tamanho finito, cujos limites físicos estão longe do feixe e da isotérmica de vaporização, que definem os limites do orifício. Como o sistema é considerado simétrico em relação a face “xz” em $y=0$, apenas uma metade do sistema é modelado. Os efeitos da tensão superficial, da transferência de energia através do sistema de contorno da peça, e da energia transferida do feixe entram no modelo via condições de contorno em equações de transporte de momento e de energia.

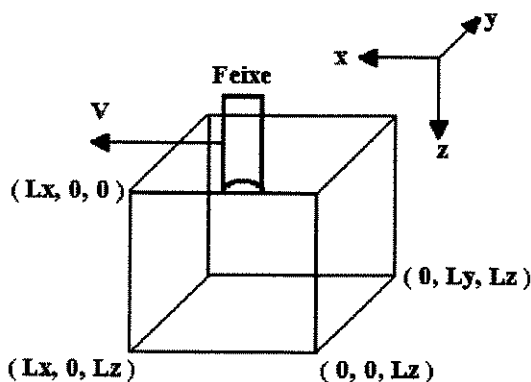


Figura 2.10 - Esquema do modelo mostrando as coordenadas relativas do sistema.

(Lambrakos et al., 1994).

2.3.3 Métodos computacionais

Na literatura foram encontrados dois trabalhos onde os autores descrevem a utilização de recursos computacionais para que o número de tentativas para se chegar a penetração desejada do cordão de solda, seja reduzida ao máximo e, conseqüentemente, torne o processo de levantamento de parâmetros de soldagem mais rápido e eficiente.

O primeiro trabalho encontrado foi o desenvolvido por Mladenov & Petrov (1993). Os autores apresentam um procedimento para o modelamento computacional para determinar os parâmetros tecnológicos de soldagem para peças grossas de aços com alto teores de carbono (0,25 à 0,5%). O procedimento alcança o seu objetivo, segundo os autores, partindo de critérios de trincamento a frio descritos na literatura. Foi desenvolvido também um algoritmo para calcular os parâmetros do processo de soldagem.

Os parâmetros tecnológicos definidos pelos autores são aqueles relativos ao conteúdo de carbono, ao tamanho do grão da austenita, a concentração de hidrogênio e ao nível de tensão na zona de fratura. São avaliados também, os processos de pré-aquecimento e a taxa de resfriamento, que deve ser tal, que se localize na região de taxa de resfriamento ótima.

Com relação aos parâmetros de processo, os autores dividem-nos em duas categorias, parâmetros que definem a quantidade de calor por unidade de comprimento: tensão, corrente de feixe e velocidade de soldagem, e parâmetros que definem a densidade de energia na região da solda: corrente de foco e distância da peça em relação ao canhão de elétrons. A relação entre estes parâmetros e as dimensões do cordão foram estabelecidas através do desenvolvimento de um experimento multifator. Assim, foi possível obter uma descrição aproximada da interação entre a penetração e outras variáveis, através da variação destes parâmetros em pequenos incrementos, conforme mostrado na equação 2.5.

$$\Delta D = a_1 \Delta T + a_2 \Delta I + a_3 \Delta v + a_4 \Delta L_1 + a_5 \Delta I_f \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde:

D = penetração em (mm)

T = tensão de aceleração em (kV)

I = corrente de feixe em (mA)

v = velocidade de soldagem em (mm/min.)

L_1 = distância da peça a ser soldada em relação ao canhão em (mm)

I_f = corrente de foco em (mA)

a_1 a a_5 = fatores de correção (adimensionais)

Os parâmetros a_1 à a_5 foram obtidos experimentalmente, através da análise da dependência da geometria do cordão em relação aos parâmetros, através da análise de regressão. No entanto, esta equação é aplicável apenas para o caso estudado. A influência da variação de cada parâmetro encontrada foi de:

variação de 1% na tensão, gerou 1,8% de variação na penetração,

variação de 1% na corrente de feixe, gerou 1,2% de variação na penetração,

variação de 1% na corrente de feixe, gerou 1,2% de variação na penetração

variação de 1% na velocidade de soldagem, gerou 0,63% de variação na penetração

variação de 1% na distância focal, gerou 1,6% de variação na penetração

variação de 1% na corrente de foco, gerou 1,7% de variação na penetração

A influência da variação de cada parâmetro na penetração encontrada pelos autores, é diferente dos valores encontrados por Giedt & Tallerico (1988).

O segundo trabalho encontrado sobre o uso de recursos computacionais para se prever a penetração do cordão de solda, foi o desenvolvido por Fathi & Lambrecht (1995). Neste trabalho, autores utilizam um sistema com lógica nebulosa (*fuzzy logic*), chamado EBFLATSY. A lógica nebulosa proposta por Zadeh, e utilizada neste trabalho, é um conceito que tenta copiar o raciocínio humano, que utiliza valores linguísticos como “grande”, “pequeno”, “médio”, “fino”, “grosso”, etc. no lugar de valores exatos. O sistema proposto, é uma abordagem para resolver o

problema da determinação dos parâmetros de soldagem, através da simplificação do problema. Utiliza um banco de dados relacionais do sistema ORACLE para armazenar os dados dos materiais e os dados dos parâmetros utilizados em soldas previamente realizadas. Para determinar os parâmetros para uma soldagem especial, o sistema trabalha em dois passos.

Passo 1: determinação do primeiro conjunto de parâmetros. Após receber os dados e a espessura do material pelo usuário, o sistema tenta encontrar dados similares em seu banco de dados. A recuperação dos dados de soldagem, a necessidade atual e a diferença entre eles sofrerão um processo de “fuzzificação”, pela transformação dos dados em variáveis linguísticas e em valores linguísticos. Durante o processo de inferência, o sistema tenta descobrir como mudar os parâmetros do banco de dados com a ajuda de regras “nebulosas” para que os parâmetros encontrados sejam adequados para a nova necessidade. Com a combinação de informações “nebulosas” com informações recentes do banco de dados, o sistema fica apto para calcular o novo conjunto de parâmetros.

Passo 2: otimização dos parâmetros. Os parâmetros calculados no primeiro passo tem que ser testados através da realização de uma soldagem com estes valores. Se o operador não ficar satisfeito com os resultados obtidos, ele poderá iniciar o processo de otimização. Usando um segundo conjunto de regras “nebulosas”, o sistema tenta melhorar os parâmetros dependendo dos defeitos descritos, de forma similar como na segunda parte do primeiro passo.

O programa de cálculo EBFLATSY, trabalha com dois conjuntos de regras diferentes, uma é utilizada para determinar o primeiro conjunto de parâmetros, e o segundo é utilizado para otimizar os resultados obtidos. Todas as regras colocadas no sistema, foram definidas com a ajuda de um especialista em soldagem por feixe de elétrons da Universidade de Dortmund, Alemanha. O componente de informação do sistema, produz um protocolo nas formas gráficas ou escrita. O protocolo gráfico mostra a determinação dos valores para as variáveis linguísticas calculadas de forma gráfica, enquanto que o protocolo escrito é gravado em um arquivo para posterior impressão. Este protocolo contém informação sobre as necessidades apresentadas, sobre o processo de inferência e sobre os resultados alcançados.

A eficiência deste sistema é muito dependente da qualidade das informações colocadas no banco de dados, da definição das regras “nebulosas” e dos valores linguísticos. Segundo os autores, os primeiros testes calculados pelo sistema, apresentaram resultados bastantes eficientes quando foram utilizados materiais comuns.

2.3.4 Resumo sobre os métodos para se prever a penetração do cordão e solda.

A seguir é apresentado um resumo sobre os métodos encontrados na literatura para se prever a penetração do cordão de solda, mostrando as vantagens e desvantagens apresentadas por cada método.

O método computacional apresentado por Mladenov & Petrov (1993) tem seu uso limitado pois as relações entre a variação de um determinado parâmetro e sua influência na penetração do cordão (equação 2.5), só podem ser usados para o equipamento utilizado pelos autores, porque como já foi citado, os parâmetros utilizados em um determinado equipamento não podem ser transferidos para outro, devido as diferenças que o sistema construtivo do canhão de elétrons causa na distribuição de energia dentro do feixe de elétrons.

Fathi & Lambrecht (1995), apresentam um método computacional que utiliza a técnica da lógica nebulosa para descrever como a variação de um determinado parâmetro afeta a penetração do cordão de solda. A dificuldade apresentada para a utilização deste método, é a necessidade de conhecimentos específicos referentes ao uso da lógica nebulosa. Além disso, a eficiência deste sistema é muito dependente da qualidade das informações colocadas no banco de dados e da definição das regras “nebulosas” e dos valores linguísticos, conforme descrito pelos próprios autores.

Lambrakos et al. (1994) desenvolveram um método numérico que apresenta outros tipos de problemas, quando comparado aos métodos computacionais. Os problemas relacionados ao uso deste método se referem a necessidade de um conhecimento profundo da teoria das restrições, e da sua realimentação com dados experimentais, além do uso da técnica do mapeamento inverso.

Desta forma, o processo volta a se tornar iterativo, e o tempo despendido para a sua execução passa a ser extenso, em consequência, ocorre a perda de agilidade no processo de levantamento de parâmetros e aumento de custo.

O método mais apropriado para o uso em um ambiente de produção, parece ser o do uso das equações 2.4a, 2.4b e 2.4c, definidas por Elmer & Giedt & Eagar (1990). Este método parece ser o mais apropriado porque apresenta relações diretas entre as propriedades do material utilizado, e os parâmetros ajustáveis de um equipamento de soldagem por feixe de elétrons. Além disso, todas as equações apresentadas foram obtidas através da realização de ensaios experimentais. Desta forma, a única incógnita a ser definida nas equações é o diâmetro do feixe de elétrons.

2.4 Técnicas para medição do diâmetro do feixe.

Conforme pode ser observado no item anterior, através do uso das equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, verifica-se que para se determinar a penetração do cordão de solda, é necessário que se conheça os parâmetros do equipamento utilizado (tensão, corrente de feixe e velocidade de soldagem), as propriedades físicas do material (condutividade, difusividade, densidade, etc) e o diâmetro do feixe. Os parâmetros do equipamento são ajustados pelo operador e, conseqüentemente, são facilmente obtidos. As propriedades dos materiais podem ser obtidos também facilmente através de “Handbooks”. A única incógnita à ser definida é o diâmetro do feixe. Desta forma, este item pretende discorrer sobre as técnicas existentes para se determinar o diâmetro de um feixe de elétrons.

Segundo Dixon (1990), o diâmetro do feixe não é determinado exatamente, e a prática usual é defini-lo em termos visuais, através de um foco intenso. O foco intenso é definido como a corrente de foco que produz o menor diâmetro determinado visualmente. Os parâmetros de soldagem incluem o valor desta corrente de foco. A dificuldade encontrada com este processo, é que o foco real é determinado subjetivamente e muda significativamente de operador para

operador, bem como de tempo em tempo para o mesmo operador. Em muitos casos esta alteração é insignificante, particularmente quando uma solda com penetração total está sendo realizada. Existem no entanto, situações onde um ajuste de foco mais preciso seja necessário para se controlar a penetração. Algumas técnicas foram desenvolvidas para evitar a subjetividade do ajuste visual. Nenhuma delas apresenta confiabilidade, repetibilidade ou aplicabilidade em uma vasta gama de parâmetros, para ser usada de uma forma rotineira. Muitas delas no entanto, são utilizadas em laboratórios de engenharia ou de desenvolvimento para estabelecer a soldabilidade de um material, ou para desenvolver parâmetros de soldagem.

As técnicas mais comuns são: arames rotativos, oscilação do feixe em uma fenda e maximização da intensidade do brilho. Com a utilização da técnica da oscilação do feixe, foi criado um sistema de diagnóstico do feixe denominado DIABEM, que também é apresentado neste capítulo no item 2.4.3. Tanto as técnicas de arame rotativo como a da oscilação do feixe, ainda segundo Dixon (1990), são difíceis de serem usadas com alta potência, porque os sensores de medição são pequenos e são destruídos pelo alto insumo de calor. O método da intensidade do brilho também falha em alta potência, porque o alto insumo de calor torna o alvo incandescente, dificultando a sua visualização pelo operador.

2.4.1 Arame rotativo

Esta técnica se utiliza de um motor de alta rotação para passar um arame através do feixe. Normalmente uma barra simples com um arame de tungstênio em cada ponta é rotacionada através do feixe, criando dois sinais por cada rotação, como mostra a figura 2.11. A corrente do feixe é coletada por um anel deslizante ligado ao eixo do motor. O ponto de maior intensidade é encontrado quando o sinal obtido pelo osciloscópio possui a menor largura de pulso. Normalmente, este tipo de motor deve operar a aproximadamente 1000 r.p.m.. Assim, se o diâmetro do feixe for de 1 mm, e o feixe intercepta o arame a 5 cm do centro de rotação, a largura do pulso será de 1.9×10^{-4} s, com 2000 pulsos por segundo. Se o diâmetro do arame for menor que o do feixe, então o tempo de subida e da descida do pulso, serão proporcionais ao diâmetro do arame, e a largura do pulso será proporcional ao diâmetro do feixe. Por outro lado, se o

diâmetro do arame for maior que o do feixe, então a largura do pulso será proporcional ao diâmetro do feixe, e mudanças do diâmetro do feixe tem que ser observadas nas regiões de subida e descida do pulso. Normalmente, ambas as condições são encontradas durante um exame em todo a gama de potência do equipamento.

Durante um ajuste de foco, o arame ficará aquecido e expandirá. Esta mudança no diâmetro do arame acarretará em uma alteração da largura do pulso. Por esta razão não é prático usar este tipo de técnica para medir precisamente o diâmetro do feixe. Ele apenas indica a condição em que o foco máximo é atingido.

Devido a alta rotação do motor (1000 rpm ou mais), e ao regime de trabalho em vácuo, faz com que ele se aqueça muito, e que a sua vida útil diminua drasticamente. Além disso, as escovas do motor se deterioram mais rapidamente no vácuo do que no ar, o que gera uma manutenção excessiva. Mesmo em baixas rotações, como o arame esquenta e resfria, ele se torna frágil e quebra, o que também contribui para reduzir a sua vida útil.

Além destes problemas, Sandstrom et al. (1970) listaram mais dois problemas utilizando esta técnica. Primeiro foi o problema relacionado a blindagem do motor, que se não fosse bem projetada, afetava o comportamento do feixe, e conseqüentemente, a precisão dos valores obtidos. Segundo, para evitar que o motor sofresse aquecimento excessivo, colocaram um sistema de refrigeração, que por sua vez gera uma dificuldade maior para colocar este tipo de dispositivo dentro de uma câmara de vácuo.

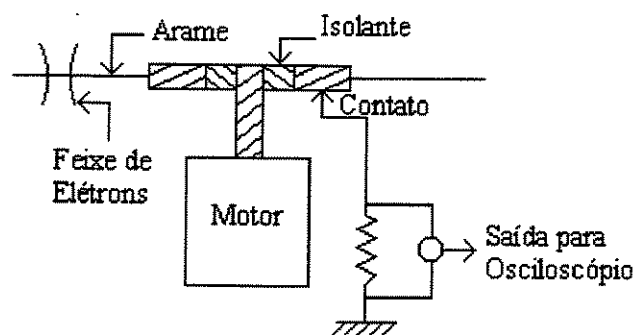


Figura 2.11 - Diagrama esquemático de um dispositivo de arames rotativos. (Dixon, 1990).

2.4.2 Oscilação do feixe

A técnica de oscilação do feixe é bastante similar à técnica de arames rotativos. Nesta técnica o feixe é defletido através de uma fenda entre duas chapas de tungstênio, e coletado por uma “Faraday cup”. Como na técnica anterior, o foco máximo é obtido quando se obtém o menor pulso de corrente. Como não há motor envolvido, os problemas relacionados com o motor são evitados. No entanto, a erosão da chapa de tungstênio é o maior problema encontrado por esta técnica, já que elas são difíceis de se fabricar, e se desgastam rapidamente em função da vaporização e da fusão.

Um dispositivo detalhado foi descrito por Hicken et al. (1991), como mostrado na figura 2.12. Para se medir o diâmetro do feixe de elétrons, este feixe é oscilado através da abertura formada por duas placas de tungstênio, montadas na face superior de um corpo de cobre, que atua como um absorvedor de calor. Assim, em qualquer instante, uma fração do feixe sempre passa através da fenda estreita formada pelas placas de tungstênio. Os elétrons remanescentes nas placas, fluem pelo corpo de cobre para o terra. Como o feixe se move através da abertura entre as chapas, a variação no fluxo de elétrons pela fenda será uma medida da distribuição da densidade de corrente do feixe.

Os elétrons que passam pela fenda estreita também passam por um canal circular de 0,635 mm de diâmetro, e são coletados por um copo de cobre cilíndrico de superfície côncava, chamada de “Faraday Cup”, e fluem através de um resistor de 100 Ω até o terra. A queda de tensão através do resistor é digitalizada em intervalos de 0,5 μ s e gravado em um osciloscópio digital. A variação da corrente com a posição (que é igual a velocidade de oscilação multiplicada pelo tempo medido do início do fluxo de corrente da Faraday Cup) é avaliada pelo registro da queda de tensão no resistor.

A fenda estreita que gera o perfil de medida é formada por duas chapas de tungstênio com 9,5 mm de espessura ($\frac{1}{2}$ ”). Estas chapas são usinadas na parte interna com um chanfro de 10°. Este chanfro fornece uma extremidade pontiaguda, que possibilita medir com precisão a largura da

amostra do feixe. Este chanfro também aumenta a área da superfície da chapa que sofre o choque dos elétrons. Isto faz com que o calor gerado pelo choque dos elétrons seja dissipado na região mais crítica, que é a extremidade das chapas. As chapas são ajustadas com a utilização de lâminas de calibrar. Idealmente, quanto mais estreita for a fenda, melhor será a medida. No entanto, o sinal da corrente tem que ser mais forte que o nível de ruído, para se obter um sinal que possa ser medido, isto é, dependente da corrente e do diâmetro do feixe. Os resultados apresentados pelos autores mostram que uma abertura da ordem de 0,025 mm é suficiente para medir feixes com altos valores de tensão e fortemente focados. Como especificação geral, é sugerido que a abertura seja de 10%, ou menor que a largura do feixe, esta medida deve incluir 95 % da potência total.

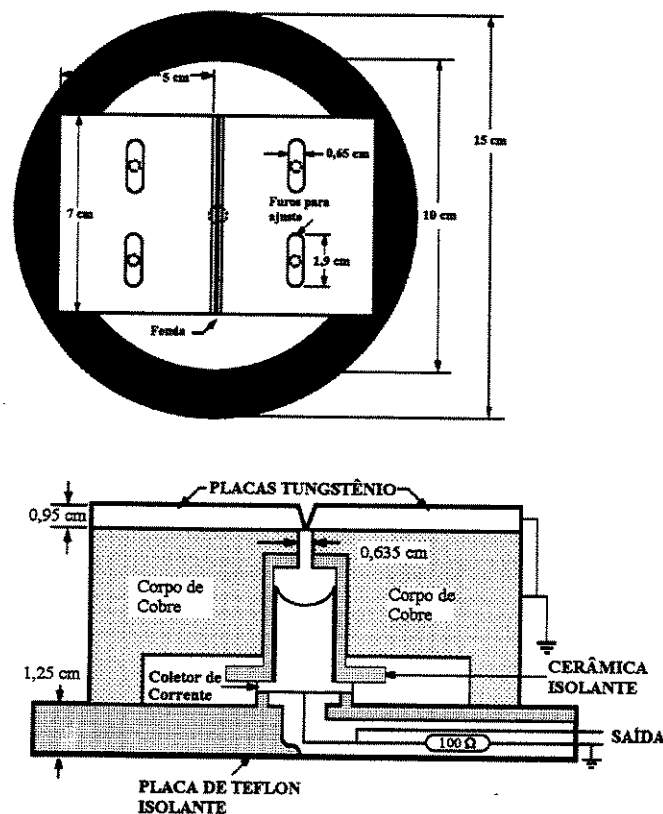


Figura 2.12 - Esquema completo de uma "Faraday Cup". (Hicken et al., 1991).

Para se obter a distribuição da corrente do feixe, ele é oscilado transversalmente em relação a fenda (eixo x), enquanto que o dispositivo desloca-se no eixo y. Em seguida o dispositivo é rotacionado em 90° para a verificação da simetria do feixe. Nesta situação, o feixe oscila na direção x, enquanto que o dispositivo se moverá na direção y, como mostrado nas figuras 2.13a e

2.13b. Os valores utilizados para a realização dos testes (frequência de oscilação = 150 Hz, amplitude de oscilação = 10 mm, e velocidade de deslocamento do dispositivo = 38,1 mm/s) foram ajustados durante os ensaios, pois não havia como prever problemas gerados, principalmente pelo aquecimento excessivo, e com a conseqüente fusão da chapa de tungstênio devido a alta concentração de energia do feixe, em diversos valores de tensão e de corrente de feixe.

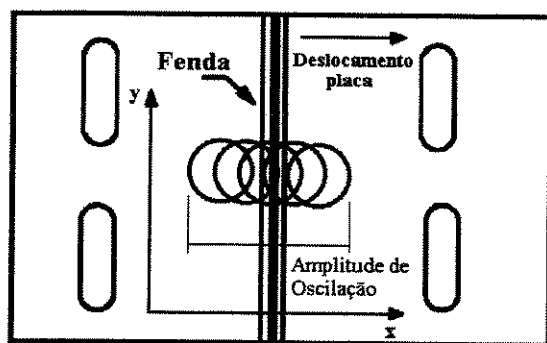


Figura 2.13a - Oscilação do feixe transversalmente a fenda.

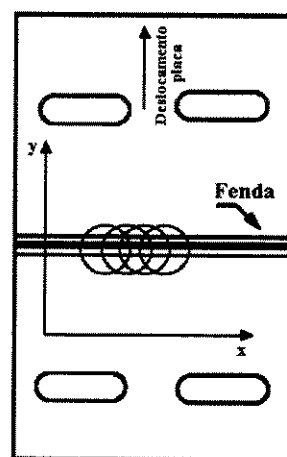


Figura 2.13b - Oscilação do feixe longitudinalmente a fenda.

O ajuste do foco foi realizado da forma normalmente utilizada, ou seja, o seu diâmetro foi minimizado em uma superfície de tungstênio, para um certo conjunto de parâmetros (tensão, corrente, distância de soldagem da peça).

O sinal típico obtido pelo osciloscópio, está mostrado nas figuras 2.14a e 2.14b. A figura 2.14a apresenta o sinal de corrente do feixe obtido, enquanto que a figura 2.14b apresenta um destes picos de forma expandida. Com os valores de frequência de oscilação do feixe e com o valor da largura do pulso gerado na "Faraday Cup", mostrados na figura 2.14b, calcula-se o diâmetro do feixe, e verifica-se, se o mesmo é simétrico nas direções x e y.

Como desvantagens desta técnica estão a fragilização da chapa de tungstênio devido ao aquecimento e resfriamento sucessivo da chapa, o difícil ajuste da folga entre as chapas, a dificuldade em se colocar toda a instrumentação dentro de uma câmara de vácuo e fazer com que

os cabos de sinais e de alimentação passem por uma parede blindada com chumbo (depende da existência de conectores disponíveis no equipamento), além de todos os pré-testes necessários para a definição de foco, frequência de oscilação, velocidade de deslocamento, taxas de amostragem e outros problemas de ordem prática.

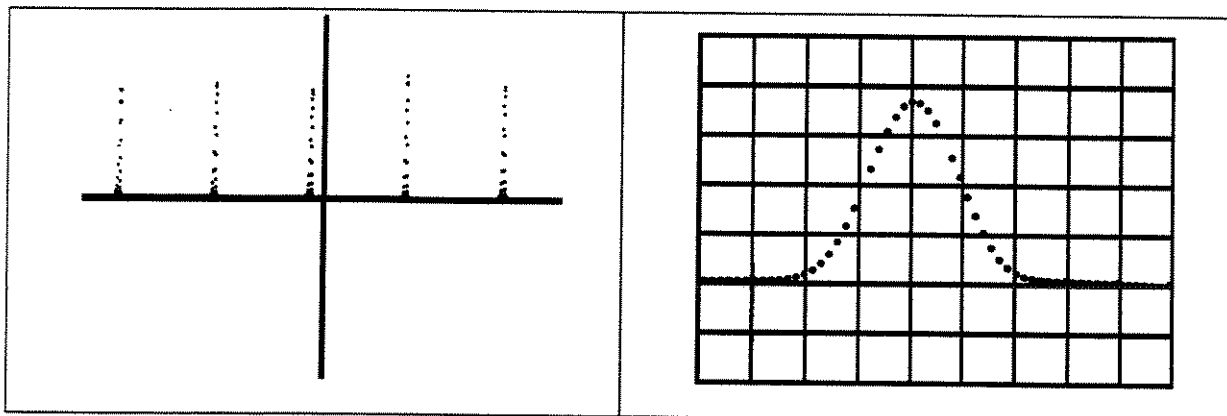


Figura 2.14a - Sinal obtido pela “Faraday Cup”. (Hicken et al., 1991).

Figura 2.14 b - Sinal ampliado.
(Hicken et al., 1991).

2.4.3 DIABEM - Sistema para Diagnóstico do Feixe

O DIABEAM além de ser uma técnica, é também uma unidade de medida da densidade de energia e do diâmetro do feixe, e foi desenvolvida pelo “Institute for Welding Fabrication” de Aachen, Alemanha. Esta unidade não é só capaz de quantificar, como também definir a característica geométrica de um feixe de elétrons, permitindo assim, que a repetibilidade das características do feixe sejam facilmente verificadas. Permite também ser utilizado como ferramenta para determinar quais os efeitos que alterações no canhão de elétrons e no sistema ótico, causam na geração do feixe.

Este sistema na verdade é evolução da técnica descrita no item anterior, pois utiliza uma “Faraday Cup” como sensor, e em vez de utilizar um osciloscópio para realizar as medidas, ele é composto por diferentes unidades de “hardware” controladas por um computador pessoal. Laflamme & Powers (1991) descrevem com detalhes os componentes deste sistema, a forma de utilizá-lo, os resultados que podem ser obtidos, e também os problemas práticos encontrados

durante a sua utilização. Um diagrama esquemático de todas as partes do sistema, está apresentado na figura 2.15.

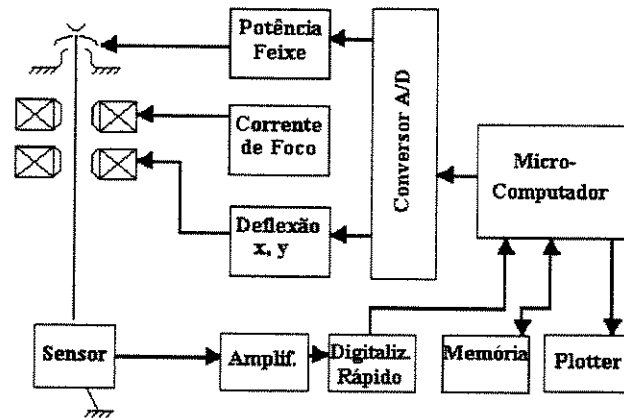


Figura 2.15 - Diagrama esquemático do sistema de diagnóstico do feixe de elétrons.

(Laflamme & Powers, 1991).

Para a segurança e facilidade de operação, o computador é ligado ao controle do feixe de elétrons e ao controle da tensão, assim, a unidade de diagnóstico pode ligar/desligar o feixe quantas vezes forem necessárias para a realizações das medidas, e como medida preventiva, a alta voltagem é travada até que o feixe se posicione corretamente, tanto no início, como no fim do ciclo de ajustes de parâmetros.

Os componentes montados dentro da câmara de vácuo são o sensor, o tipo do alvo (fenda ou furo), e o sistema de elevação para o posicionamento do sensor. Toda a parte de alimentação/comunicação eletro-eletrônica, além da linha de água do sistema de refrigeração do sensor e do alvo, tem de passar para dentro da câmara de vácuo. Esta é a parte mais difícil de ser realizada, pois depende da disponibilidade de uma quantidade suficiente de portas de acesso e de conectores “feedthrough”.

O alvo é constituído de uma chapa aterrada, contendo uma abertura que pode ser uma fenda ou um furo para permitir que o feixe passe através dele até atingir a “Faraday Cup”, como pode ser visto na figura 2.16. A abertura possui uma largura típica de 10 microns que é

aproximadamente menor que o tamanho do feixe quando focado. O feixe de elétrons é escaneado através desta abertura pelo controle da deflexão realizado pelo computador, e a magnitude da corrente gerada na “Faraday Cup”, posicionada abaixo desta abertura, corresponderá ao nível de densidade de energia da porção do feixe que está passando através da abertura.

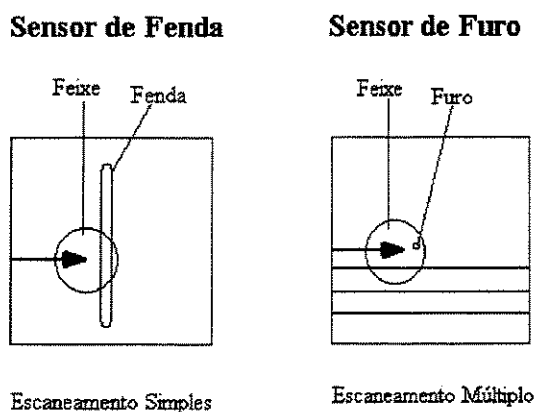


Figura 2.16 - Diagrama esquemático dos sensores. (Laflamme & Powers, 1991).

Existe a possibilidade do uso de dois programas de diagnóstico. A escolha depende do tipo de dados que se pretende obter, e qual tipo do sensor utilizado., fenda ou furo. No caso do uso do sensor de furo, escaneamento múltiplos são realizados enquanto o feixe move-se automaticamente através do campo, como mostrado na figura 2.16. Os sinais elétricos correspondentes a cada escaneamento individual são filtrados, amplificados, e então digitalizados e armazenados pelo computador, antes que ocorra o próximo escaneamento. A integração de todos os perfis do feixe para uma dada condição, constitui o teste do feixe. Isto pode ser realizado automaticamente em poucos minutos após a instalação de todo “hardware”.

A medida com o sensor e fenda requer apenas um escaneamento, necessitando portanto de um tempo menor para a sua realização. No entanto, a medida com este tipo de sensor é melhor utilizada para comparar as características do feixe, enquanto ocorre a variação de uma única variável (ex. corrente de foco, ou distância de trabalho), além disso requer um certo número de medidas para que a comparação possa ser feita. Assim como no sensor de furo, cada escaneada é processada e registrada no computador para análise. O tempo total para realizar o teste com o

sensor de fenda (tempo necessário para realizar uma série de escaneamento individuais) é dependente do número de pontos a serem comparados e do tempo necessário para mudar as variáveis entre diferentes escaneamentos.

O “software” especial desenvolvido para este sistema de diagnóstico, é a chave principal para a facilidade de operação e de interpretação dos dados. Baseado nos dados de entrada do equipamento e dos ajustes feitos, o computador gera os sinais apropriados para controlar os parâmetros críticos do feixe (potência do feixe,, velocidade de escaneamento e posição) e sincronizá-los para a gravação. Uma vez que os dados brutos de um determinado teste (tanto sensor de fenda quanto de furo) foram armazenados, um subprograma separado pode ser utilizado para representar a informação graficamente ou numericamente, em uma impressora ou plotter.

Os dados típicos obtidos com a utilização do sensor de fenda são apresentados pela figura 2.17. Este gráfico bidimensional, apresenta a variação da largura do cordão de solda, em função da variação da corrente de foco (eixo ‘x’), e em função de diversos valores de corrente de feixe. Mostra ainda, em valores fora de escala, a variação da penetração (linha mais grossa) também em função da corrente de foco. Pode-se verificar que a menor largura do cordão é obtida, no mesmo ponto em que se é obtido o maior valor de penetração. Este valor é definido como o foco máximo possível de ser obtido com os parâmetros utilizados, e está determinado entre 74 e 76 mA de corrente de foco.

O sensor de furo permite mostrar a distribuição da energia do feixe de forma bidimensionais, ou tridimensionais. Dilthey et al. (1997) apresentam as distribuições de energia do feixe das duas formas. Na figura 2.18, é apresentada uma distribuição de energia do feixe de forma bidimensional, onde as diferentes escalas de cinza representam diferentes áreas de densidade de energia.

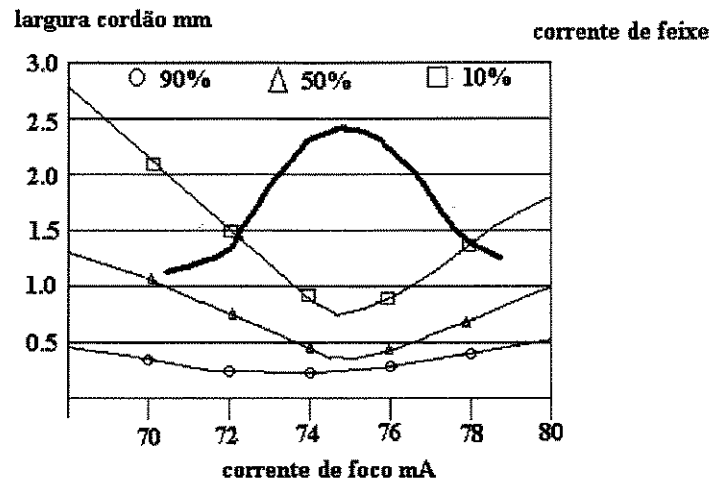


Figura 2.17 - Dados típicos obtidos com o uso do sensor de fenda.
(Laflamme & Powers, 1991).



Figura 2.18 - Distribuição de energia obtido com o uso do sistema de diagnóstico do feixe de elétrons. (Diltthey et al., 1997).

Na figura 2.19 é mostrada a distribuição de energia do feixe de duas máquinas (A e B), ajustadas com o mesmo conjunto de parâmetros, e sem usar a deflexão. Nesta figura fica fácil perceber a diferença na distribuição da energia do feixe, entre duas máquinas.

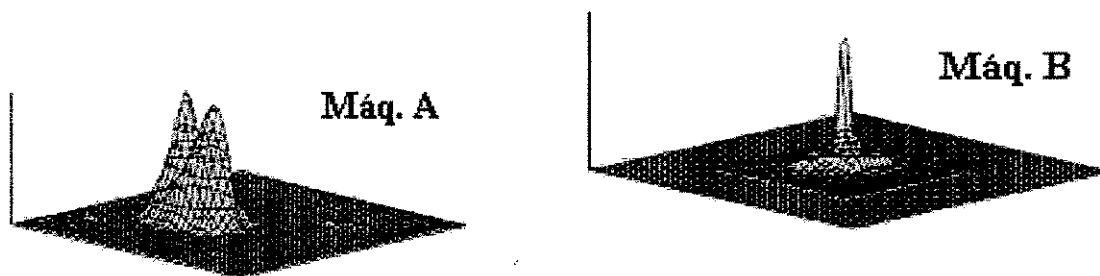


Figura 2.19 - Distribuição de energia obtida com sensor de furo. (Diltthey et al., 1997).

A figura 2.20, apresenta uma comparação da distribuição de energia do feixe para uma mesma, quando é introduzida a deflexão do feixe.

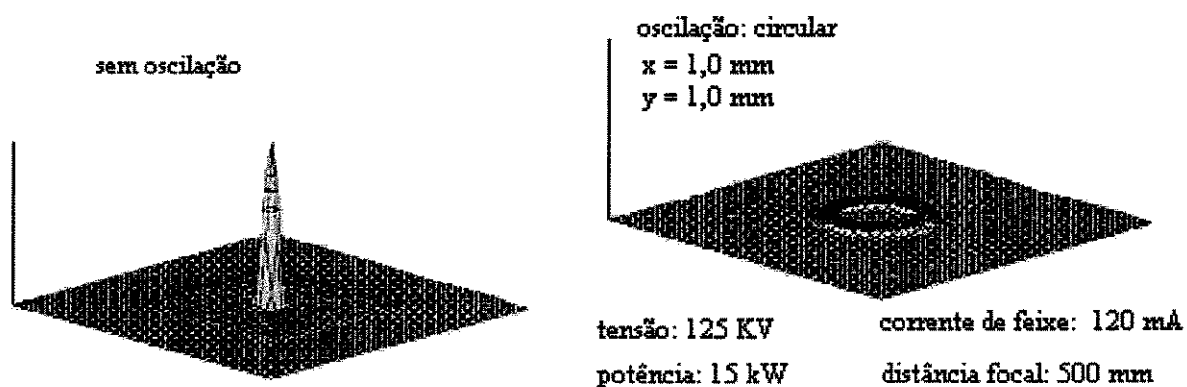


Figura 2.20 - Comparação da distribuição de energia de um feixe de mesma potência sem oscilação e com oscilação. (Diltthey et al., 1997).

Este mesmo sistema de diagnóstico, foi utilizado por Diltthey & Weiser (1997) para investigar a influência das características do feixe de elétrons na morfologia do cordão de solda.

2.4.4 Intensidade do brilho

Todas as técnicas descritas nos itens anteriores, utilizam uma série de equipamentos e de sensores para obter o valor do diâmetro médio do feixe, ou então, o valor da densidade de potência, para uma determinada combinação entre tensão de aceleração, corrente de feixe, corrente de foco e distância entre o canhão de elétrons e a peça. O processo mais simples para se obter este diâmetro médio, é o de se maximizar a densidade de potência através do ajuste do foco. Este foco é ajustado de forma que o feixe apresente um brilho o mais intenso possível na superfície de trabalho. Este procedimento é normalmente realizado com a utilização de um bloco de tungstênio posicionado na mesma altura da junta a ser soldada, e colocando-se sobre ele os mesmos parâmetros que serão utilizados na soldagem. O ajuste deste foco é controlado através da alteração do parâmetro “corrente de foco”.

Apesar desta técnica aparentemente ser a mais simples de todas as apresentadas, não foi encontrado na literatura pesquisada, nenhuma informação sobre o procedimento e/ou informação de como realizar a marcação do feixe de elétrons no bloco de tungstênio, ou então, a forma de realizar esta medida, apesar desta técnica ter sido utilizada em trabalhos publicados por Tong & Giedt (1971) e por Elmer et al. (1990). A dificuldade em se medir este diâmetro foi descrito por Galvão & Trevisan (1999 a), onde os autores mostram que a marca deixada pelo feixe de elétrons além de apresentar dois diâmetros, um interno referente a um orifício no interior da marca, e um externo referente ao diâmetro total da marca que inclui o material que foi expelido para fora do orifício, apresenta também um formato irregular.

A única referência encontrada na literatura a este respeito, porém com poucas informações, foi encontrada no trabalho de Lambrakos et al. (1994). Neste trabalho, os autores mostram uma marca do feixe de elétrons que foi realizada com o uso de uma potência aproximada de 3 kW, no entanto, estes mesmos autores não especificaram os valores utilizados de tensão de aceleração e de corrente de feixe, apenas mostraram que o tempo de exposição do feixe no bloco de tungstênio foi de 0,25 s, e que este procedimento gerou uma marca com um diâmetro de 0,232 mm.

2.4.5 Resumo sobre as técnicas para medição do diâmetro do feixe de elétrons

A seguir é apresentado um resumo sobre as técnicas para medir o diâmetro do feixe de elétrons encontrados na literatura, mostrando as vantagens e desvantagens apresentadas por cada técnica

Todas as técnicas encontradas apresentam vantagens e desvantagens. Os métodos mais precisos são os que utilizam uma “Faraday Cup”, como o sistema DIABEM, que possui uma gama de recursos muito grande, não só para se medir o diâmetro do feixe de elétrons, como também para fazer um diagnóstico preciso da distribuição da energia dentro deste mesmo feixe. No entanto, o uso desta técnica implica em diversas desvantagens. A principal desvantagem está relacionada a passagem de cabos de alimentação e de instrumentação para o interior de uma câmara de vácuo, e da passagem da água do sistema de refrigeração da “Faraday Cup”. A passagem dos cabos de alimentação e de passagem de água só são possíveis de serem realizadas se houver conectores do tipo “feedthrough” disponíveis, caso contrário será necessário abrir furos na parede da câmara para passar estes cabos, isto pode vir a gerar problemas de vedação da câmara. Outro ponto importante que deve ser ressaltado sobre a abertura de pontos na câmara do equipamento, é que esta câmara é blindada com chumbo para evitar que os raios-x gerados pelo feixe de elétrons passem para o ambiente e venham a expor à radiação as pessoas que trabalham com este equipamento.

Outra desvantagem apresentada pelo uso desta técnica se refere ao tempo necessário para realizar os ajustes do equipamento no interior da câmara de vácuo, e a todas as dificuldades geradas por esta operação. Além disso, seria necessário também a aquisição do software, ou então o desenvolvimento de outro software para tratamento dos dados adquiridos.

Parte destes problemas se repetem quando se utiliza a técnica dos arames rotativos. Além do problema da passagem dos cabos, existe também o problema do desgaste excessivo do motor e da alteração do diâmetro do arame. Esta alteração no diâmetro do arame acarretará em uma perda de

precisão do sistema, além de aumentar a fragilidade do arame devido ao seu sucessivo aquecimento/resfriamento.

A técnica para a medição do diâmetro do feixe que aparenta ter maior simplicidade de uso, rapidez de execução, baixo custo e ainda, precisão adequada para o uso em um ambiente de produção, é a técnica da medição do diâmetro do feixe em um bloco de tungstênio. O problema para o uso desta técnica, é que não existe na literatura a descrição de como esta medição é realizada. As informações existentes são de que Elmer et al. (1990) utilizaram esta técnica para medir o diâmetro do feixe, e da dificuldade encontrada para a realização da medida deste diâmetro, já que esta marca apresentava dois diâmetros, conforme já descrito neste capítulo no item 2.4.4, no trabalho desenvolvido por Galvão & Trevisan (1999 a).

Através desta extensiva revisão bibliográfica, fica claro a ausência de um procedimento detalhado para se medir o diâmetro de um feixe de elétrons que possa ser utilizado em um ambiente de produção. Face a esta ausência de procedimento, este trabalho propõe-se a desenvolver um procedimento confiável, de fácil utilização e de baixo custo, que permita medir o diâmetro do feixe de elétrons.

Capítulo 3

Procedimento Experimental

Neste capítulo são apresentadas as características do material utilizado como corpo de prova, os dados do equipamento utilizado para a realização dos ensaios, os métodos de elevação de corrente disponíveis no equipamento, os ensaios preliminares, o planejamento estatístico do ensaio, e os instrumentos utilizados para realizar as medidas dos diâmetros.

3.1 Material utilizado

Para a realização dos experimentos foram utilizadas duas barras de tungstênio com 609 mm de comprimento por 17,5 mm de diâmetro, importadas da PHILIPS ELMET dos Estados Unidos da América. A densidade do material utilizado no experimento foi de 18720 kg/m^3 , o que corresponde a 97% da densidade do tungstênio puro, que é de 19250 kg/m^3 , segundo Webelements (2000).

Estas duas barras foram divididas em 24 blocos de tungstênio com 46 mm de comprimento cada, conforme mostrado na figura 3.1, e cortados através do processo de eletro-erosão, para que fosse mantido o paralelismo entre as duas superfícies dos corpos de prova, pois uma delas foi utilizada como superfície de referência de apoio, enquanto que a outra superfície, foi exposta ao feixe de elétrons. A medida final dos corpos de prova ficou sendo de $45,97 \pm 0,01 \text{ mm}$ de comprimento, com os mesmos 17,5 mm de diâmetro. Não houve nenhum processo de usinagem

para corrigir as variações do diâmetro, pois o mesmo não foi utilizado como superfície de referência em nenhum dos testes realizados.

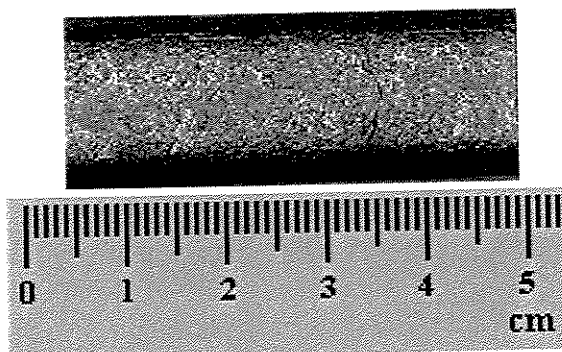


Figura 3.1 - Corpo de prova de tungstênio com diâmetro de 17,5 mm e 46 mm de comprimento.

3.2 Equipamento .

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de solda por feixe de elétrons da MESSER GRIESHEIN cedida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, instalada no Centro Experimental ARAMAR, localizada no município de Iperó no estado de São Paulo. Este equipamento é equipado com controle numérico da própria MESSER GRIESHEIN, com movimento da mesa nos eixos “x” e eixo “y” além de possuir uma placa rotativa com controle de posição e de velocidade de rotação. As características principais do equipamento estão descritas a seguir:

Vácuo do canhão :	10^{-6} mbar
Vácuo da câmara :	10^{-2} mbar
Câmara de vácuo :	750x800x1750mm
Tensão de aceleração :	90 a 150 kV (ajustável)
Corrente de feixe :	0 à 100 mA
Mesa com 3 eixos :	“x”, “y” e “a” (placa rotativa)

Na figura 3.2 têm-se uma visão geral do equipamento utilizado para a realização dos ensaios, mostrando o canhão de elétrons, o sistema ótico, o painel de controle e a câmara de vácuo.

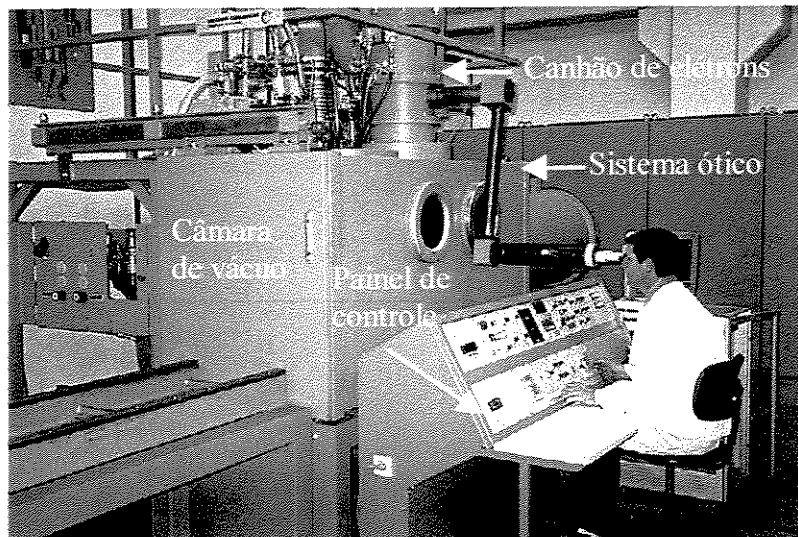


Figura 3.2 - Visão geral do equipamento de soldagem por feixe de elétrons.

O equipamento pode ser operado manualmente, ou então de forma automática através do CNC. Na operação automática, todos os parâmetros de soldagem utilizados neste ensaio: corrente de foco, corrente de feixe, tempo de elevação da corrente e o tempo que o feixe permanece ligado são fixados através das linhas de programação, apenas o valor da tensão de aceleração não pode ser programado via CNC. A tensão de aceleração é fixada através do uso de um potenciômetro instalado no painel de controle do equipamento, acoplado a um voltímetro, que permite ajustar o seu valor com uma resolução de leitura da ordem de 0,1 kV.

3.3 Realização dos ensaios

Os corpos de prova foram montados de seis em seis peças em uma mesa de alumínio de 300x300 mm, de modo que a face dos corpos de prova estivessem a uma altura de 288 mm em relação a mesa de movimentação. Este valor de 288 mm foi definido para que as faces dos corpos de prova estivessem na mesma altura da linha de centro formada pelo contraponto e pelo centro

da placa rotativa, que representa a altura do centro da câmara de vácuo. Para garantir que as faces de todos os corpos de prova estivessem a uma mesma altura de ensaio, e que também estivessem perpendiculares em relação ao feixe de elétrons, a mesa de fixação foi nivelada tanto no eixo “x” como no eixo “y”. A figura 3.3 mostra o esquema de montagem dos corpos de prova na mesa de alumínio, bem como o sistema de coordenadas da mesa de movimentação do equipamento.

A decisão de se montar seis corpos de prova ao mesmo tempo na mesa de fixação foi tomada para se reduzir o tempo de realização dos ensaios, já que o processo de soldagem por feixe de elétrons requer uma sequência de operações no equipamento para poder ser realizada. Para se realizar uma única soldagem é necessário primeiro fixar a peça a ser soldada à mesa do equipamento, e fazer todos os ajustes de montagem, fora da câmara de vácuo. Em seguida, colocar todo o conjunto para dentro da câmara de vácuo, iniciar o processo de bombeamento da câmara, e aguardar até que ocorra a liberação do equipamento para realizar a soldagem. Normalmente, o tempo para se executar o processo de bombeamento da câmara de vácuo e obter a liberação para soldagem gira em torno de 06 (seis) minutos. Com este tipo de montagem (seis corpos de prova simultâneos), foi necessário bombear a câmara de vácuo apenas 04 (quatro) vezes para se ensaiar os 24 (vinte e quatro) corpos de provas.



Figura 3.3 - Esquema de montagem dos corpos de prova para realização do ensaio.

Na figura 3.4 pode-se ver em detalhe a montagem dos 06 (seis) corpos de prova na mesa de fixação.

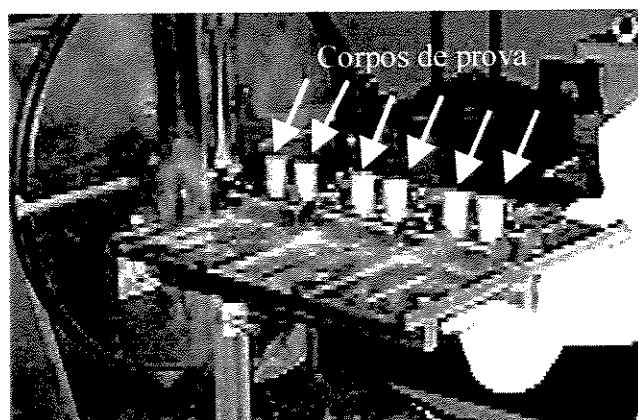


Figura 3.4 - Detalhe da montagem dos corpos de prova.

3.4 Planejamento Estatístico

Segundo a literatura existente, Lubin (1968), Sandstrom (1970), Fritz (1997) e Diltney & Weiser (1997), o diâmetro do feixe de elétrons varia tanto em função do valor da tensão de aceleração, como do valor da corrente de feixe. No entanto, as questões da forma de elevação da corrente de feixe, bem como o tempo de exposição necessário para que o feixe de elétrons produza uma marca em um bloco de tungstênio, que permita realizar medidas do seu diâmetro, não são abordadas por esta mesma literatura.

Desta forma, o experimento foi desenvolvido de forma a permitir a comparação entre diferentes métodos de elevação de corrente de feixe e de diferentes tempos de exposição necessários para que se possa medir este diâmetro, em função de valores de tensão de aceleração e de corrente de feixe preestabelecidos.

Para a realização do ensaio, decidiu-se então pelo uso do planejamento estatístico fatorial com três variáveis de influência: tensão, corrente de feixe e tempo/forma de exposição. Para as

variáveis tensão de aceleração e corrente de feixe foram utilizados dois níveis, enquanto que para a variável tempo/forma de exposição foram utilizados três níveis, para que fosse possível verificar como estas três variáveis, de forma independente ou combinadas, podem afetar o valor do diâmetro do feixe. A combinação entre estas três variáveis de influência proporcionou a existência de 12 (doze) condições diferentes para a realização do ensaio. Decidiu-se também que seriam realizadas apenas duas réplicas para cada condição de ensaio, o que acarretou a utilização de 24 (vinte e quatro) corpos de prova.

3.4.1 Definição dos valores de tensão de aceleração e de corrente de feixe.

O equipamento permite variar a potência do feixe de 0 à 15 kW, através da combinação dos valores de tensão de aceleração (90 – 150 kV) e de corrente de feixe (0 – 100 mA). Para evitar que o número de ensaios fossem excessivos (para cobrir toda a faixa e variação de potência), foram escolhidos apenas dois níveis para cada uma destas variáveis, de modo que representassem em quase a sua totalidade, os valores de potência utilizados em treze anos de operação do equipamento utilizado. Procurou-se então trabalhar com o teto de 50% da potência, e os valores escolhidos para a realização do ensaio foram de:

Tensão de aceleração:	110 e 140 kV
Corrente de feixe:	10 e 50 mA.

Com a combinação entre os valores de tensão de aceleração e de corrente de feixe, obtêm-se 04 (quatro) valores de potência:

Potência (kW)	Tensão de aceleração (kV)	Corrente de feixe (mA)
1,1	110	10
1,4	140	10
5,5	110	50
7,0	140	50

3.4.2 Definição dos valores de corrente de foco.

O ajuste do foco do feixe de elétrons foi realizado de forma visual, e ajustado para estar posicionado na superfície de teste. Este ajuste foi realizado da seguinte forma:

- a tensão de aceleração desejada é ajustada através de um potenciômetro localizado no painel de controle da máquina;
- liga-se o feixe de elétrons com uma corrente de feixe bem baixa, menor que 1 mA, na superfície onde se deseja ajustar o foco;
- o operador da máquina varia a corrente de foco até obter um ponto luminoso que tenha o máximo de brilho com o menor diâmetro possível;
- achado este ponto, o valor da corrente de foco que aparece no amperímetro do painel de controle é anotado e colocado posteriormente no programa de soldagem.

Este tipo de ajuste garante precisão e repetibilidade, além de ser bastante adequado para ser utilizado neste tipo de ensaio, conforme descrito por Galvão & Trevisan (1999 b). Os valores da corrente de foco encontrados com este tipo de ajuste foram de: 1, 990 mA para a tensão de 110 kV, e de 2, 297 mA para a tensão de 140 kV. Assim, os valores das variáveis tensão de aceleração, corrente de feixe e corrente de foco, para a realização dos ensaios, são:

Tensão de aceleração (kV)	Corrente de feixe (mA)	Corrente de foco (mA)
110	10	1,990
140	10	2,297
110	50	1,990
140	50	2,297

3.4.3 Formas de elevação da corrente de feixe.

O equipamento utilizado para este ensaio permite que a elevação da corrente de feixe do valor “0” (zero) até um valor pré-determinado, seja realizada de duas formas básicas: a elevação direta, e a elevação gradual, representadas pelas figuras 3.5a e 3.5b.

A figura 3.5a representa a elevação da corrente de forma direta, isto é, quando o feixe é ligado e a corrente sobe instantaneamente para o valor “ I_o ”, e permanece ligado por um determinado tempo “ t_o ”. Na verdade, o valor da corrente de feixe leva um tempo infinitesimal “ t_i ” para atingir o valor estabelecido. Este tempo “ t_i ” depende das características de construção do equipamento, e sobre o qual não se tem nenhum controle.

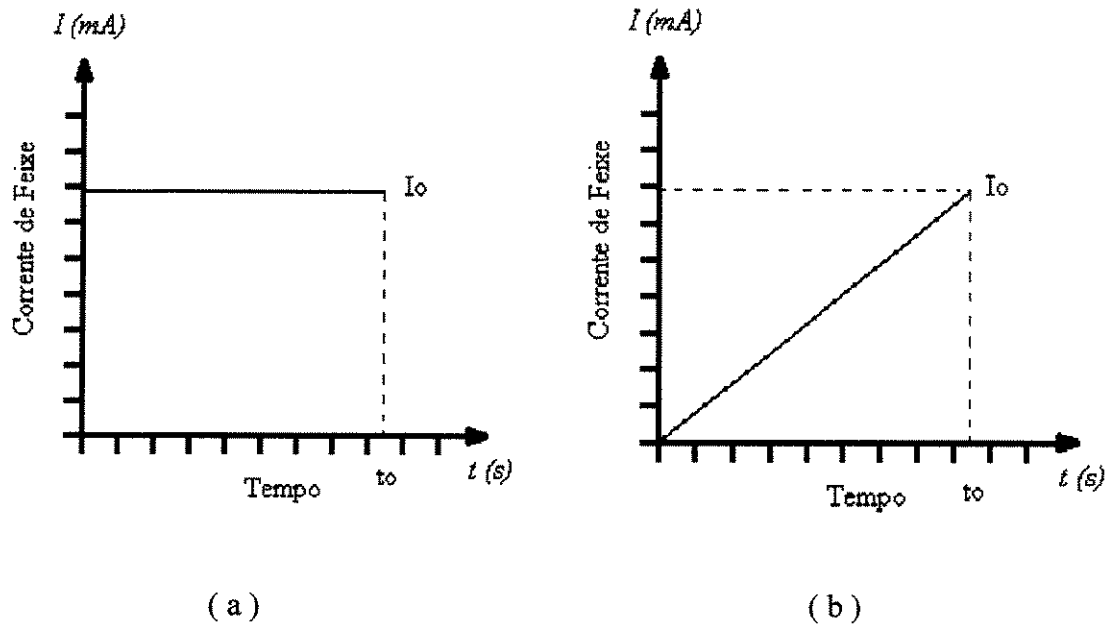


Figura 3.5 - Formas de elevação da corrente de feixe.

Já a figura 3.5b, representa a forma gradual de elevação da corrente. Na programação do equipamento existe uma função onde são definidos o valor da corrente de feixe “ I_o ”, e o tempo “ t_o ”, referente ao tempo que o feixe permanece ligado para que a corrente saia de zero e atinja o valor “ I_o ”. Esta ação é realizada através de uma interpolação linear, executada internamente pelo CNC do equipamento.

Comparando-se os dois métodos disponíveis de elevação de corrente de feixe, pode-se verificar que o método da elevação gradual da corrente apresenta algumas vantagens em relação ao método da elevação direta. A primeira vantagem está relacionada com o aporte de calor nos corpos de prova. Comparando-se o aporte de calor em um corpo de prova com uma corrente “ I_o ”, ocorrido em um tempo “ t_o ”, como mostrado nas figuras 3.5a e 3.5b, o valor introduzido pelo método de elevação da corrente gradual é a metade do valor apresentado pelo método direto.

Com um menor aporte de calor, as características do material sofrem menos alterações, permitindo que se tenha um comportamento mais uniforme do material.

Outra vantagem está relacionada com a marca que o feixe de elétrons produz nos corpos de prova com o método da elevação gradual. O método da elevação gradual produz marcas com aspecto mais uniforme que as geradas pelo método da elevação direta. Além disso, em ensaios realizados preliminarmente para a definição da forma de condução do ensaio, o método da elevação da corrente de feixe gradual apresentou um desempenho melhor. Isto ocorreu devido a dificuldade em se elevar a corrente de feixe de forma direta quando se utilizou tensão de aceleração de 140 kV e corrente de feixe de 50 mA. Como a variação da corrente de feixe é muito alta em um curto espaço de tempo, o equipamento não suportava esta elevação brusca, tendo como consequência a queda da alta tensão, inviabilizando assim a realização dos ensaios.

Desta forma, decidiu-se que o método de elevação de corrente de feixe mais apropriado para ser utilizado na realização dos ensaios seria o método gradual. Com o método para a elevação da corrente de feixe definido, torna-se necessário a definição do tempo mínimo de abertura “to” do feixe para que seja possível obter uma marca que represente com precisão o diâmetro do feixe de elétrons. Este tempo deve ser suficientemente curto para se ter um menor aporte de calor, mas ao mesmo tempo, deve ser suficiente para que o equipamento consiga elevar a corrente até o valor desejado. Caso este tempo “to” seja muito curto, o método da elevação gradual da corrente se aproximará do método da elevação direta, o que causará os problemas já descritos.

Novamente com base em ensaios realizados preliminarmente, o menor tempo necessário para que o equipamento atingisse o valor de corrente de feixe de 50 mA, ajustado para um valor de tensão de aceleração de 140 kV, (que é a combinação dos maiores valores de corrente de feixe e de tensão de aceleração utilizados neste ensaio) foi de 2 s.

Com base no exposto acima, definiu-se o primeiro método de elevação de corrente de feixe chamado de “Método 1”. Neste método a elevação da corrente de feixe é realizada de forma gradual com o tempo de elevação de 2 (dois) segundos, que é o tempo mínimo necessário para

realizar o ensaio com a condição mais crítica, (tensão de aceleração = 140 kV, corrente de feixe = 50 mA), e semelhante ao mostrado na figura 3.5b.

O segundo método de elevação de corrente, denominado “Método 2”, foi definido como sendo o mesmo método de elevação de corrente de feixe utilizado pelo Método 1, porém com o tempo de elevação de corrente “ t_o ” fixado em 4 (quatro) segundos. O objetivo deste segundo método é o de verificar se o tempo “ t_o ” utilizado para elevar a corrente de feixe tem influência no diâmetro da marca deixada pelo feixe.

Como o método de elevação da corrente de feixe utilizado nos Métodos 1 e 2 é feito de forma gradual e linear, assim que a corrente de feixe atinge o valor nominal definido para o ensaio, o feixe de elétrons é desligado. Desta forma, o tempo que o feixe permanece com o valor nominal definido é muito pequeno. Para verificar se o método de elevação gradual da corrente de feixe, permite que o diâmetro da marca deixada pelo feixe de elétrons no bloco de tungstênio seja correspondente ao valor real que deveria atingir, propôs-se um terceiro método, denominado “Método 3”.

Neste terceiro método a elevação da corrente de feixe é feita em duas etapas. A primeira etapa é realizada da mesma forma que o método da elevação gradual, a corrente de feixe é elevada do valor “0” até o valor “ I_o ” em um tempo (t'). Na segunda etapa, a corrente “ I_o ” permanece estabilizada até o tempo (t_o), conforme representado na figura 3.6. A segunda etapa deste método de elevação de corrente de feixe é utilizada para permitir que o feixe de elétrons permaneça com o seu valor nominal “ I_o ” por um tempo maior.

Com isso, é possível verificar se o método de elevação gradual de corrente de feixe utilizada nos Métodos 1 e 2, permite que o feixe de elétrons gere uma marca com um diâmetro que represente com confiabilidade o seu valor real. Decidiu-se então, que para este método a elevação da corrente seria feita de modo gradual em 2 segundos, e após este tempo permaneceria com este mesmo valor por mais 2 segundos.

Com a utilização de 3 (três) métodos de elevação de corrente de feixe, podem ser feitas duas análises diferentes à seu respeito. Através da comparação entre o Método 1 e o Método 2, será verificado se o tempo (2 e 4 segundos) utilizado para se elevar a corrente de feixe de 0 mA até o seu valor nominal, tem influência na determinação do diâmetro do feixe de elétrons. Comparando-se o Método 2 com o Método 3, será possível verificar se a forma de elevação da corrente de feixe tem influência na determinação deste diâmetro, já que o feixe permanecerá ligado pelo mesmo tempo (4 segundos) nestes dois métodos.

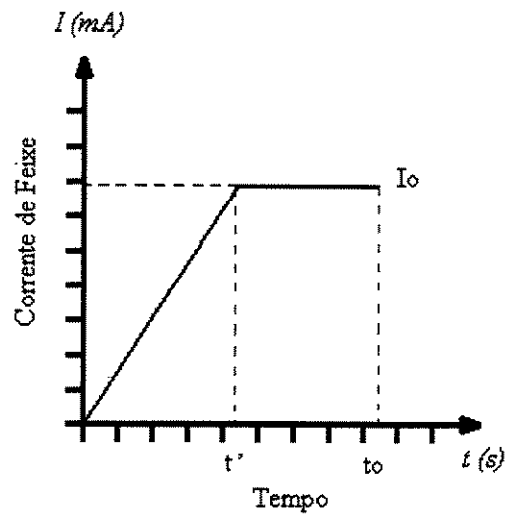


Figura 3.6 - Forma de elevação da corrente de feixe utilizada pelo “Método 3”.

Com a definição de 03 (três) métodos de elevação de corrente, juntamente com os 04 (quatro) níveis de potência utilizados, obtém-se um total de 12 (doze) valores de energia envolvidos neste experimento, como mostrado na tabela 3.1. Pode-se ver por esta tabela, que o Método 2 introduz o dobro de energia que o Método 1, e que o Método 3 introduz o triplo de energia que o Método 1 e 50% a mais que o Método 2. Estes 04 (quatro) valores de potência, juntamente com os 12 (doze) valores de energia introduzidos nos corpos de prova, permite que se possa fazer uma análise bastante diversificada do comportamento do diâmetro do feixe, dependendo da ótica em que deseja realizar esta análise.

Tabela 3.1 – Energias envolvidas em função das potências e dos métodos utilizados.

	Potência (kW)			
	1,1	1,4	5,5	7,0
Método 1	1,1 kJ	1,4 kJ	5,5 kJ	7,0 kJ
Método 2	2,2 kJ	2,8 kJ	11,0 kJ	14,0 kJ
Método 3	3,3 kJ	4,2 kJ	16,5 kJ	21,0 kJ

Com os valores definidos para o ensaio da tensão de aceleração, corrente de feixe e método de elevação de corrente, montou-se a tabela 3.2, que além de mostrar estas variáveis, mostra também a sequência aleatória com que o ensaio foi conduzido.

Tabela 3.2 - Tabela com valores de tensão, corrente de feixe, método de elevação de corrente de feixe e sequência de ensaio utilizados.

		Método 1		Método 2		Método 3	
		Tensão (kV)		Tensão (kV)		Tensão (kV)	
		110	140	110	140	110	140
Corrente de feixe (mA)	10	21/22	19/24	2/11	5/16	10/18	14/23
	50	3/17	6/13	4/9	12/20	1/7	8/15

3.5 Medidas do diâmetro do feixe

3.5.1 Medidas preliminares com o uso de um projetor de perfil

As marcas que o feixe de elétrons deixa nos corpos de prova apresentam-se basicamente de duas formas. O primeiro tipo de marca ocorre quando praticamente não existe a expulsão de material de seu interior, e o segundo tipo de marca, é a que ocorre quando há um volume considerável de material expelido do seu interior, conforme mostrado nas figuras 3.7a e 3.7b, respectivamente. A questão da expulsão de material do interior da marca deixada pelo feixe de elétrons, será tratada com mais detalhes no capítulo 4 – “Resultados e Discussões”.

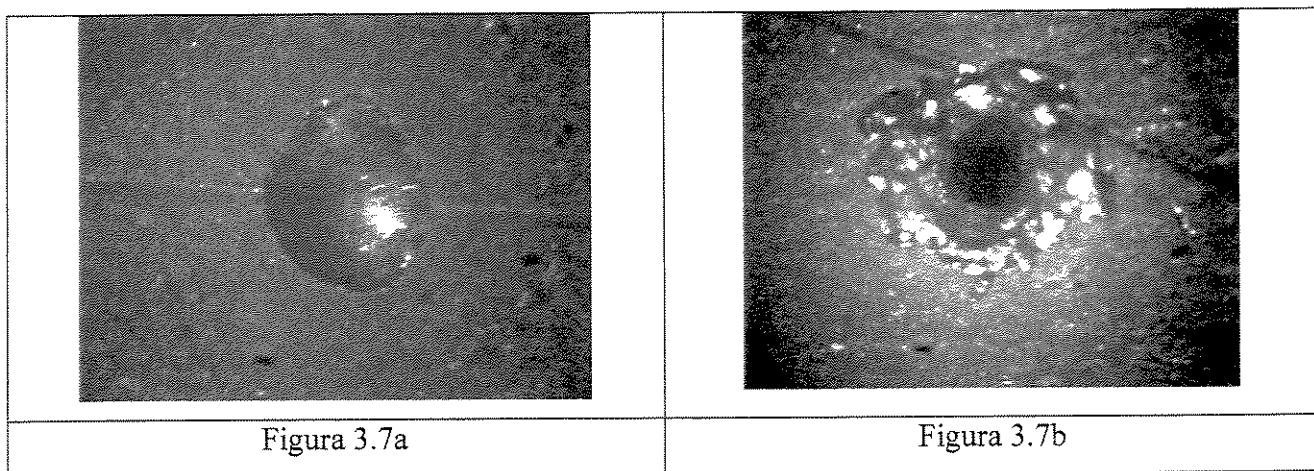


Figura 3.7 - Marcas típicas do feixe de elétrons sem expulsão de material e com expulsão de material, respectivamente.

Em função da existência de material expulso de dentro da marca deixada pelo feixe de elétrons, as primeiras medidas referem-se a análise do comportamento deste material que foi expelido. Para realizar estas medidas, foi utilizado um projetor de perfil comum (da marca Microtécnica), facilmente encontrado em qualquer indústria que possua uma sala destinada a realizar a metrologia de suas peças. Foi utilizado um aumento de 10x para se medir a altura “h” e o diâmetro externo “d” deste material, conforme mostrado na figura 3.8. Foi possível realizar medidas apenas para as potências de 5,5 kW e 7,0 kW, já que para as potências de 1,1kW e 1,4 kW não houve material expelido o suficiente para que a medida pudesse ser realizada. Como a olho nu estas marcas apresentaram uma boa circularidade, foram realizadas apenas uma medida do diâmetro “d” e uma medida da altura “h”. Como a análise com o projetor de perfil foi preliminar, e devido a falta de recursos deste equipamento para se registrar as imagens projetadas, não há registros visuais destas medidas neste trabalho.

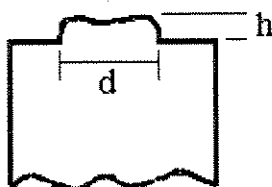


Figura 3.8 - Desenho esquemático do material expelido do orifício gerado pelo feixe de elétrons.

3.5.2 Medidas do diâmetro com o uso de um analisador de imagens

O uso de um projetor de perfil não permite obter imagens como as fotos apresentadas nas figuras 3.7a e 3.7b, conseqüentemente, não é possível utilizar este tipo de instrumento para se medir o diâmetro da marca deixada pelo feixe de elétrons. Para fazer este tipo de registro, e realizar a medida deste diâmetro, foi necessário utilizar um analisador de imagens.

O conjunto do equipamento para fazer as medidas e análises das imagens é composto por: um microscópio da marca “Leica” acoplado à um microcomputador, um programa que faz a análise das imagens denominado “Global Lab Image”, e por uma fonte de luz para a iluminação dos corpos de prova. Este equipamento está instalado no laboratório do Departamento de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp. Todas as medidas dos 24 (vinte e quatro) corpos de prova foram realizadas com uma lente de aumento de 2x, sendo que, para os corpos de prova que foram ensaiados sob a corrente de feixe de 10 mA, foi necessário uma maior aproximação das lentes para poder se obter medidas com maior precisão.

Como a marca característica gerada pelo feixe de elétrons apresenta dois diâmetros, o diâmetro externo “De” referente ao diâmetro do material expelido, e o diâmetro interno “Di” referente ao diâmetro do orifício gerado, conforme apresentado na figura 3.9, todos os 24 (vinte e quatro corpos de prova) tiveram estes dois diâmetros medidos. Como as marcas geradas apresentam um formato irregular, isto é, não são circulares, as medidas tanto dos diâmetros externos “De”, como dos diâmetros internos “Di”, foram realizadas em quatro pontos diferentes, uma na direção vertical, uma na horizontal e duas nas diagonais ($+45^\circ$ e -45°), conforme mostrado na figura 3.10, para que fosse possível obter um valor médio confiável dos diâmetros.

A decisão de se medir tanto o diâmetro externo como o diâmetro interno, foi tomada para verificar qual destes dois diâmetros é o verdadeiro representante do diâmetro do feixe de elétrons.

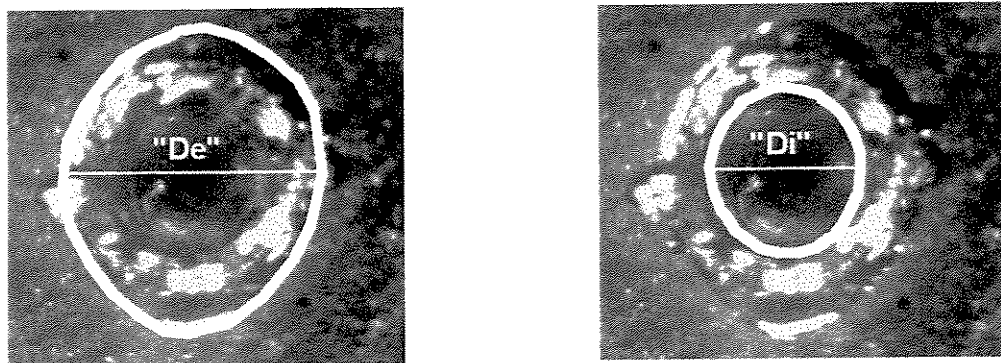


Figura 3.9 - Definição do diâmetro interno do orifício.

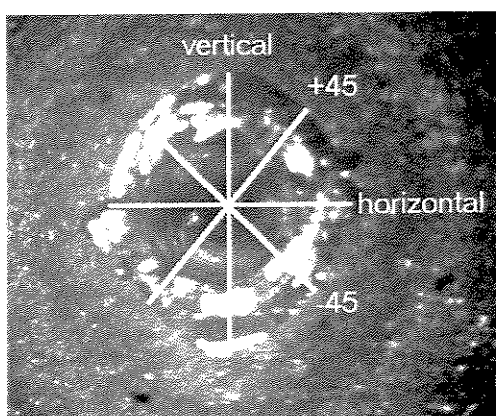


Figura 3.10 - Detalhe das direções de medição dos diâmetros externos e internos.

3.5.3 Medidas do diâmetro após a retirada do material expelido do orifício com o uso de um analisador de imagens

A execução das medidas do diâmetro interno “Di”, realizadas conforme descrito no item anterior, está sujeita a erros devido a dificuldade em se definir com exatidão a superfície correta de medição. A dificuldade na definição correta da superfície de medição ocorre porque o orifício gerado apresenta uma seção cônica, conforme apresentado na figura 3.11. Além do formato cônico, outro fator que contribui para dificultar a realização das medidas, é o fato da superfície do material que foi expelido para fora do orifício estar acima da face do corpo de prova, que é a superfície de referência.

Com estes dois fatores combinados, as medidas dos diâmetros podem vir a ser realizadas em um plano acima ou abaixo desta face, acarretando em uma série de valores errados, que podem comprometer a análise do comportamento do diâmetro.

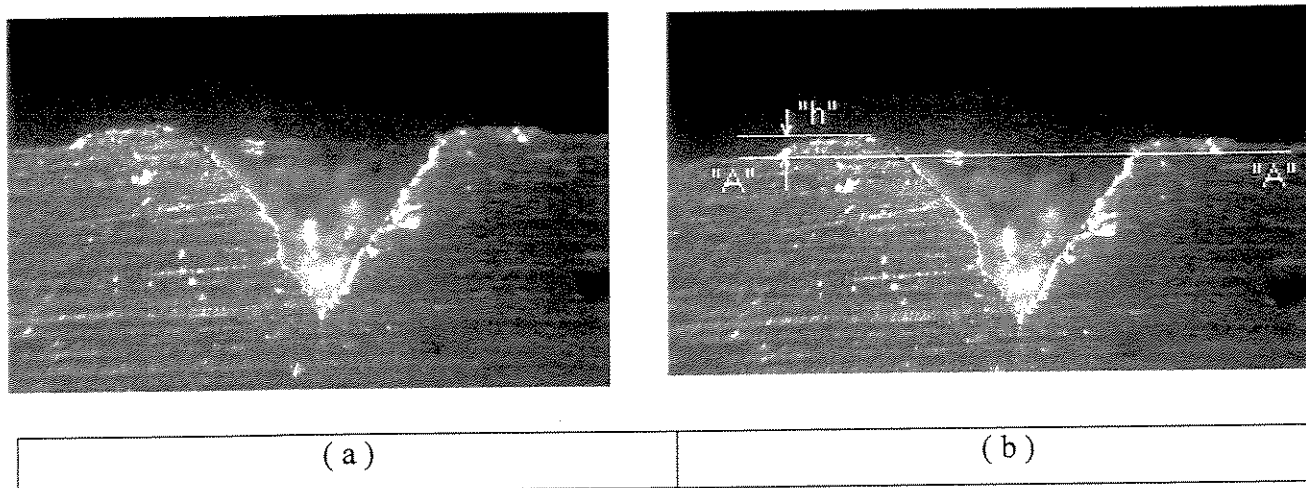


Figura 3.11 - Corte transversal do orifício gerado pelo feixe de elétrons.

Para solucionar este problema, decidiu-se retirar o excesso de material de forma manual com a utilização de uma lixa d'água grana 180, em uma máquina de polir com rotação de 300 rpm. Tomou-se um cuidado especial para garantir que não fosse retirado mais material que o necessário, através do controle da medida do comprimento total do corpo de prova, que foi mantida constante.

A figura 3.12 mostra como ficou a marca depois da retirada do excesso de material. Nela pode-se ver claramente a marca deixada pelo material que foi expelido do orifício, e o diâmetro do orifício muito bem definido. Como a marca ainda apresenta um formato irregular, a medição também foi realizada em quatro pontos diferentes, da mesma maneira que foi utilizada para se medir os diâmetros antes da retirada de material, conforme descrito no item 3.5.2. Com a utilização deste procedimento, obtêm-se um valor do diâmetro do orifício mais preciso, já que ele não está sujeito aos erros de posicionamento devido ao excesso de material.

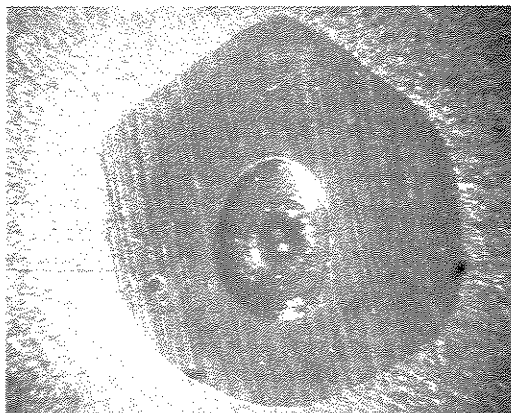


Figura 3.12 - Foto de marca típica deixada pelo feixe de elétrons após retirada do material expelido do orifício.

Todos os dados obtidos de diâmetro do feixe e altura do material expelido, obtidos com o projetor de perfil, assim como os dados iniciais de diâmetro externo e diâmetro interno obtidos com o uso de um analisador de imagens, foram tratados apenas considerando a média aritmética das duas amostras para cada condição de ensaio. Como os dados referentes ao diâmetro interno após a retirada do material expelido para fora do orifício, são os valores que efetivamente representam o comportamento do diâmetro do feixe de elétrons, estes dados além de serem analisados via média aritmética, foram tratados também estatisticamente, através da análise de variância, para verificar se a dispersão dos dados obtidos para cada condição de ensaio, permite realizar conclusões com maior confiabilidade.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo define-se qual diâmetro (diâmetro externo ou interno) deve ser utilizado nos modelos matemáticos de previsão de penetração, define-se também como deve ser realizada a medida deste diâmetro, além do método mais apropriado para se elevar a corrente de feixe. Para se chegar a estas definições os resultados do comportamento do diâmetro do feixe de elétrons são apresentados e discutidos sob as diversas condições de ensaio utilizadas. Para facilitar a análise deste comportamento, este capítulo foi dividido em Resultados Preliminares e Resultados Finais. No item Resultados Preliminares, faz-se uma análise visual do comportamento das marcas deixadas pelo feixe de elétrons através de imagens obtidas com um analisador de imagens, e do diâmetro externo e da altura do material expelido do orifício obtidos com o uso de um projetor de perfil. No item Resultados Finais, faz-se uma análise e discute-se os dados dos diâmetros externos e internos destas marcas, obtidos com o uso de um analisador de imagens, para no final, propor um método para se medir o diâmetro do feixe de elétrons que possa ser utilizado nos modelos matemáticos apresentados no capítulo 2, item 2.3.1.

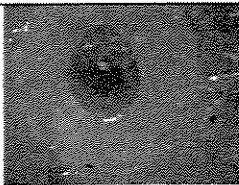
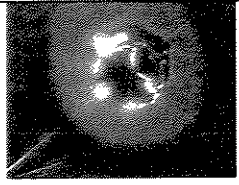
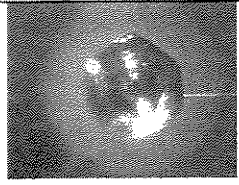
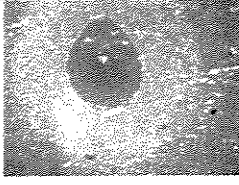
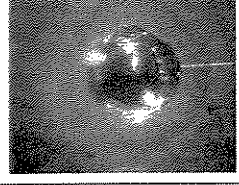
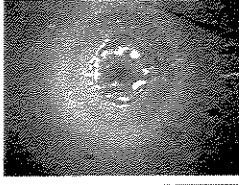
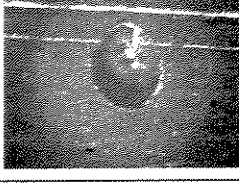
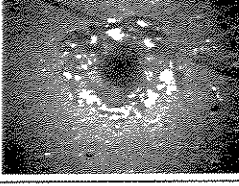
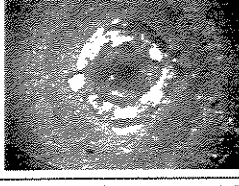
4.1 Resultados Preliminares

4.1.1 Análise visual

A primeira análise de dados à ser realizada é a análise visual das marcas deixadas pelo feixe de elétrons nos corpos de prova, obtidas com o uso de um analisador de imagens. Esta análise visual fornece o conhecimento necessário sobre o comportamento destas marcas, em função da

tensão de aceleração e da corrente de feixe, que é a base sobre a qual é possível propor um método confiável para se medir o diâmetro do feixe de elétrons. As fotos das marcas obtidas estão apresentadas a seguir na tabela 4.1, em função do método de elevação de corrente de feixe utilizado (Métodos 1, 2 e 3), e em função das correntes de feixe e da tensão de aceleração.

Tabela 4.1 - Marcas do feixe de elétrons nos corpos de prova.

			Corrente de Feixe (mA)	
			10	50
Método 1	Tensão (kV)	110		
			Corpo de prova 21	Corpo de prova 3
		140		
			Corpo de prova 19	Corpo de prova 13
Método 2	Tensão (kV)	110		
			Corpo de prova 11	Corpo de prova 9
		140		
			Corpo de prova 16	Corpo de prova 20
Método 3	Tensão (kV)	110		
			Corpo de prova 10	Corpo de prova 7
		140		
			Corpo de prova 14	Corpo de prova 15

Todas as fotos apresentadas na tabela 4.1 foram obtidas com o uso de uma lente de aumento 2x. No entanto, como os diâmetros obtidos com a corrente de feixe de 50 mA foram maiores que os obtidos com a corrente de feixe de 10 mA, as fotos representantes da condição de corrente de feixe com 10 mA, foram realizadas com uma maior aproximação da lente, para que fosse possível fazer uma comparação entre estas marcas sob as duas condições de corrente de feixe.

Uma das primeiras observações que pode ser feita através das fotos apresentadas na tabela 4.1, é que as marcas deixadas pelo feixe de elétrons nos corpos de prova ensaiados com corrente de feixe de 10 mA e tensão de aceleração de 110 kV (Métodos 1, 2 e 3) aparentam ter um único diâmetro. Como pela análise destas fotos não é possível verificar a existência de material expulso de dentro do orifício, os valores de diâmetros obtidos são considerados a princípio, como sendo referentes ao diâmetro interno “Di”.

Outra observação que pode ser feita é que, embora a literatura que aborda modelos matemáticos para a previsão da penetração do cordão de solda ((Hashimoto & Matsuda (1967), Lubin (1968), Tong & Giedt (1971) e Elmer & Giedt & Eagar (1990)), se refira sempre ao “diâmetro” do feixe de elétrons, nota-se facilmente pela análise das figuras dos corpos de prova 21, 19, 11, 16, 10 e 14, que as marcas deixadas pelo feixe de elétrons não são perfeitamente circulares.

Na verdade, as marcas deixadas apresentam uma forma elíptica, com o semi-eixo maior da elipse apresentando uma direção preferencial que coincide com o eixo “y” de movimentação da mesa do equipamento utilizado, como pode ser visto na figura 4.1, onde as duas linhas mais claras representam a direção “x” do eixo de movimentação. Para se ter uma idéia mais clara sobre a diferença encontrada, foi realizada uma medida simples entre os dois semi-eixos da marca do corpo de prova n.º 10, utilizando o software Coreldraw 4. Esta medida foi realizada de forma qualitativa através do uso dos pixels das fotos. Verificou-se que o semi-eixo maior (vertical) é 25% maior que o semi-eixo menor (horizontal).

As duas linhas mais claras que aparecem na figura 4.1 foram feitas nos corpos de prova antes da realização do ensaio. Os corpos de prova foram montados no dispositivo de ensaio de forma a que todas estas marcas estivessem alinhadas na direção “x” do eixo de movimentação da mesa do equipamento, justamente para permitir que fosse verificada a posteriori a possível existência de erros de forma.

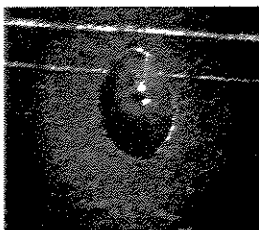


Figura 4.1 - Marca realizada por feixe de elétrons no corpo de prova 10.

Esta forma elíptica é facilmente percebida em todos os corpos de prova que foram ensaiados com corrente de feixe de 10 mA, independentemente do valor de tensão de aceleração utilizado no ensaio, seja este valor de 110 kV ou 140 kV. Quando muda-se o valor da corrente de feixe de 10 mA para 50 mA, percebe-se que a marca deixada pelo feixe de elétrons tende a apresentar uma forma mais circular. Esta maior circularidade também é independente do valor de tensão de aceleração utilizado. No entanto, através de uma análise mais cuidadosa das fotos dos corpos de prova cuja corrente de feixe utilizada foi de 50 mA, nota-se que a marca deixada pelo feixe de elétrons também é irregular, porém de forma menos pronunciada, como pode ser visto na figura 4.2.

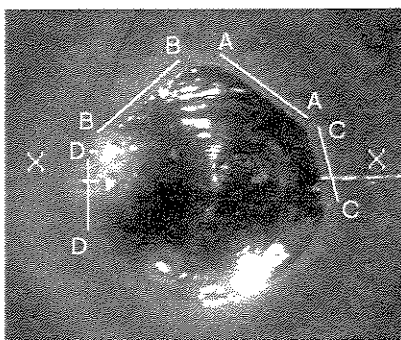


Figura 4.2 - Marca realizada por feixe de elétrons no corpo de prova 17.

Nesta mesma figura, pode-se ver a linha de referência “X – X” na mesma posição horizontal que a apresentada pela figura 4.1. Vê-se nesta figura que a parte inferior da marca, ou hemisfério inferior, apresenta uma melhor circularidade que o hemisfério superior. No hemisfério

superior são notadas duas seções lineares partindo do ponto mais alto e com inclinação aproximada de 45 graus, e que são paralelas aos segmentos de reta “A – A” e “B – B”. Pode-se notar ainda que esta mesma marca apresenta outras duas seções lineares que estão localizadas nas laterais, e que são paralelas aos segmentos de reta “C – C” e “D – D”.

Para verificar se esta marca além das irregularidades descritas também apresentava uma forma elíptica, mediu-se de forma qualitativa através dos pixels da foto do corpo de prova n.º 17, os semi-eixos vertical e horizontal utilizando novamente o software Coreldraw 4 . Neste caso, verificou-se que o semi-eixo vertical, que é o semi-eixo maior, é apenas 5% maior que o semi-eixo horizontal, o que demonstra que a marca gerada pelo feixe de elétrons tende a tornar-se mais circular com o aumento da corrente de feixe.

O formato elíptico do feixe também foi encontrado por Sandstrom et al. (1970), que verificou a simetria do feixe em função da distância da peça em relação ao canhão de elétrons, utilizando uma tensão de aceleração de 10 kV e corrente de feixe de 40 mA, como mostrado na figura 4.3. Segundo este mesmo autor, este efeito é decorrente do astigmatismo do canhão de elétrons. O problema do astigmatismo também foi descrito por Fritz (1997), que inclui outros fatores que afetam o formato do feixe de elétrons, como o efeito de cargas espaciais e o efeito da velocidade térmica.

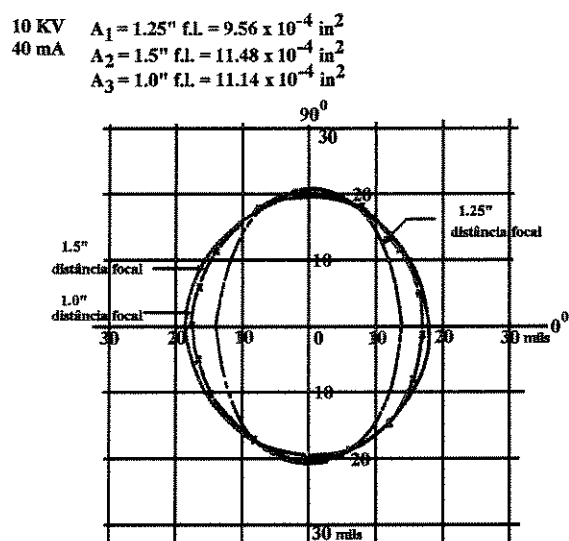


Figura 4.3 - Assimetria do feixe de elétrons em função da distância de trabalho.

(Sandstrom et al., 1970).

O aumento da corrente de feixe, além de provocar um aumento na uniformidade da marca gerada, também provocou um aumento em seu “diâmetro”, facilmente perceptível a olho nu. Este aumento de “diâmetro” é função do efeito da força de repulsão que ocorre devido a carga elétrica dos elétrons, conforme descrito por Fritz (1997). Esta força de repulsão faz com que os elétrons que estão na parte mais externa do envelope do feixe sejam defletidos para fora deste, aumentando assim o seu “diâmetro”. Este mesmo tipo de comportamento, aumento do diâmetro do feixe com o aumento da corrente, foi constatado também por Sandstrom et al. (1970).

Outro comportamento que se nota facilmente em todos os corpos de prova é o aparecimento de um orifício no meio da marca deixada pelo feixe de elétrons, sempre que se aumenta o valor da tensão de aceleração, independentemente do método de elevação de corrente utilizado, isto é, independente da utilização do Método 1, 2 ou 3. Este fato ocorre porque com o aumento da tensão de aceleração, a velocidade com que os elétrons atingem o corpo de prova é maior. Com uma velocidade de impacto maior, a energia transferida é maior, fazendo com que os elétrons consigam penetrar mais nos corpos de prova, provocando assim o surgimento de um orifício no centro da marca. O surgimento deste orifício ocorre na parte central da marca, devido a diferença na distribuição da energia que ocorre dentro do feixe de elétrons, como mostra a figura 4.4, apresentada por Powers & Laflamme (1991), com tensão de aceleração de 150 kV, corrente de feixe de 20 mA e distância do canhão de 350 mm.



Figura 4.4 - Distribuição de energia dentro de um feixe de elétrons.
(Powers & Laflamme, 1991).

Nesta figura pode-se perceber que a distribuição da energia dentro do feixe de elétrons não é uniforme. A parte mais central da figura é a que apresenta os maiores valores de densidades de

energia, assim, quanto mais próximo do centro, maior é a concentração de energia. Esta maior concentração de energia na parte central do feixe de elétrons explica a formação do orifício nesta mesma região. Através desta mesma figura, pode-se também explicar o porque do formato irregular da marca deixada pelo feixe de elétrons. Como esta distribuição de energia apresenta uma forma irregular, a marca deixada pelo feixe de elétrons consequentemente terá uma forma irregular.

Outro comportamento que surge com a criação do orifício, é a expulsão de material de dentro deste orifício para a parte superior externa da marca. O material que está localizado na área de maior concentração de energia passa por um processo de fusão, e como o feixe de elétrons tem energia suficiente para penetrar no corpo de prova, o material que foi fundido é expulso desta área, e se solidifica na parte externa ao orifício gerado, acompanhando o seu formato circular. Este material solidificado vai estar a uma altura “h” da face do corpo de prova, e vai apresentar um diâmetro “d”, como mostrado esquematicamente, através de um corte transversal de um corpo de prova, na figura 4.5, e também pela foto da figura 3.10, apresentada no capítulo 3.

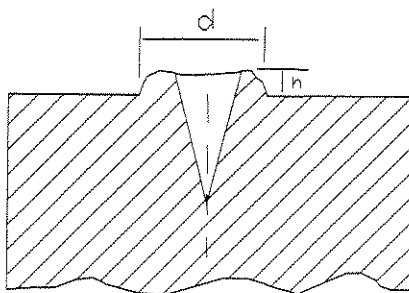


Figura 4.5 - Corte esquemático de um corpo de prova mostrando o orifício gerado pelo feixe de elétrons.

4.1.2 Análise do comportamento do material expelido

Para fazer o estudo do comportamento do material expelido do orifício, é realizada uma análise visual das fotos da tabela 4.1 em conjunto com uma análise dimensional da altura “h” e do diâmetro “d” dos corpos de prova, obtidos com um projetor de perfil Microtécnica com um

aumento de 10x. Os valores de altura “h” e do diâmetro “d” estão apresentados na tabela 4.2, em função da corrente de feixe, da tensão de aceleração e do método de elevação de corrente de feixe.

Tabela 4.2 - Medidas do material expulso do orifício gerado pelo feixe de elétrons, medidos com projetor de perfil para corpos de prova ensaiados com corrente de feixe de 50 mA.

Método 1				Método 2				Método3			
Tensão (kV)				Tensão (kV)				Tensão (kV)			
110		140		110		140		110		140	
“h” (mm)	“d” (mm)	“h” (mm)	“d” (mm)	“h” (mm)	“d” (mm)	“h” (mm)	“d” (mm)	“h” (mm)	“d” (mm)	“h” (mm)	“d” (mm)
0.33	3.10	0.45	3.50	0.39	3.50	0.46	4.60	0.17	3.30	0.27	4.30
Cp 3		Cp 6		Cp 4		Cp 12		Cp 1		Cp 8	
0.30	3.00	0.40	3.60	0.40	3.35	0.43	4.40	0.18	3.40	0.20	4.20
Cp 17		Cp 13		Cp 9		Cp 20		Cp 7		Cp 15	

Como não houve material expelido do orifício quando foi utilizada a corrente de feixe de 10 mA com tensão de aceleração de 110 kV, e como o volume de material expelido foi insuficiente quando se utilizou a corrente de feixe de 10 mA com a tensão de aceleração de 140 kV, os valores da altura “h” e do diâmetro “d” para estas condições de ensaio não são apresentados nesta tabela. Estas medidas não foram realizadas com o projetor de perfil, devido ao volume de material para a condição de corrente de feixe=10 mA e tensão de aceleração=140 kV ser muito pequeno (fotos dos corpos de prova 19, 16 e 14) em relação ao diâmetro do corpo de prova (17,1 mm), gerando uma grande dificuldade para ajustar o foco do projetor de perfil.

Pode-se ver também pela análise das fotos da tabela 4.1 a forma como o material expelido se relaciona com as variáveis: corrente de feixe e tensão de aceleração. Aumentando-se a tensão de aceleração, para um mesmo valor de corrente de feixe (ex.: corpos de prova 21 e 19 com I= 10 mA, e corpos de prova 3 e 13 com I=50 mA), há uma quantidade maior de material expelido para fora do orifício, do que aumentando-se a corrente de feixe com um mesmo valor de

tensão de aceleração (ex.: corpos de prova 21 e 3 com $T=110$ kV, e corpos de prova 19 e 13 com $T=140$ kV).

Este fato fica parcialmente comprovado (já que não há dados para comparar a variação de “h” quando a tensão de aceleração é constante e se varia a corrente de feixe de 10 mA para 50 mA) quando se compara as alturas “h”, mostradas na tabela 4.2, e obtidas quando utilizou-se corrente de feixe de 50 mA e tensão de aceleração de 110 kV e de 140 kV, para os Métodos 1, 2 e 3. Os resultados obtidos das medidas de “h” mostram que quando a tensão de aceleração passa de 110 kV para 140 kV, as alturas médias passam de 0,31 mm para 0,43 mm no Método 1, de 0,39 mm para 0,44 mm no Método 2, e de 0,17 mm para 0,24 mm no Método 3. Estes dados são apresentados através do gráfico da figura 4.6.

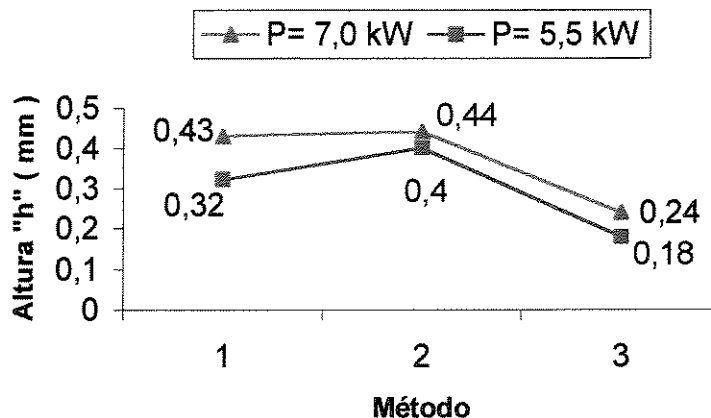


Figura 4.6 - Altura “h” de material expelido do orifício em função do método de elevação de corrente de feixe e da potência do feixe.

Da análise da figura 4.6 pode-se ver que independente do método de elevação da corrente de feixe, a altura do material expelido para fora do orifício aumentou com o aumento da potência utilizada. Este comportamento é novamente explicado devido ao fato do aumento da potência ter ocorrido através do aumento da tensão de aceleração, que provoca um aumento na velocidade dos elétrons, o que permite que ocorra um aumento da penetração. Com o feixe penetrando mais no corpo de prova, houve mais material sendo expelido para fora do orifício.

O aumento da altura deste material quando se passa do Método 1 para o Método 2, independentemente da potência utilizada, é explicado pelo fato de se estar dobrando a energia do feixe de elétrons. No entanto, o mesmo não ocorre quando se passa do Método 1, ou do Método 2, para o Método 3. Neste caso, mesmo aumentando-se a energia do feixe de elétrons, o comportamento foi exatamente o oposto, ou seja, a altura do material expelido foi menor. Como neste caso apenas a medida do diâmetro pode ser realizada pela projeção da imagem, o que pode ter acontecido é que embora a altura tenha sido menor, a diferença entre os diâmetros externo (medido) e o diâmetro interno (que não foi possível de ser medido por este método) tenha sido maior, fazendo com que um volume maior de material tenha sido expelido para fora do orifício.

Analisando o comportamento do diâmetro externo do material expelido em função do método e da potência através do gráfico apresentado na figura 4.7, vê-se que o mesmo é semelhante ao comportamento apresentado pela altura “h”, apresentado na figura 4.6, ou seja, o diâmetro externo do material expelido aumenta quando se aumenta a potência, independentemente do método de elevação de corrente de feixe utilizado. O aumento do diâmetro com o aumento da potência, ocorre devido ao aumento da tensão de aceleração. Observa-se também que ocorre um aumento no diâmetro, quando se passa do Método 1 (3,1 mm e 3,6 mm) para o Método 2 (3,4 mm e 4,5 mm), enquanto que há uma ligeira diminuição quando se passa do Método 2 (3,4 mm e 4,5 mm), para o Método 3 (3,3 mm e 4,3 mm).

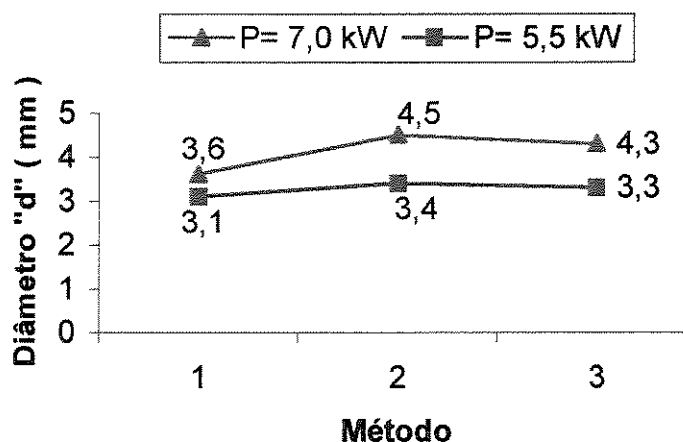


Figura 4.7 - Diâmetro “d” de material expelido do orifício em função do método de elevação de corrente de feixe e da potência do feixe.

A diferença de comportamento encontrada quando se compara o comportamento da altura “h” e do diâmetro “d”, é de que enquanto a altura “h” do material expelido no Método 3 é sempre menor que o obtido pelos Métodos 1 e 2, os valores de diâmetro obtidos no Método 3, são praticamente iguais aos obtidos no Método 2, porém maiores que os obtidos no Método 1. Ou seja, enquanto a altura “h” sofre uma queda brusca quando passa do Método 2 para o Método 3, o decréscimo apresentado pelo diâmetro quando se passa do Método 2 para o Método 3 é bastante discreto. Como com a utilização do projetor de perfil não foi possível medir o diâmetro interno das marcas, não existem dados suficientes para que se possa explicar este tipo de comportamento.

4.2 Resultados Finais

Após a análise do comportamento do material expelido da marca do feixe de elétrons ter sido realizada no item “Resultados Preliminares”, passa-se para a fase final da análise, onde faz-se um estudo do comportamento dos diâmetros externos e internos destas marcas, com dados obtidos através da utilização de um analisador de imagens, com o objetivo de se definir qual destes dois diâmetros deve ser utilizado nos modelos matemáticos para previsão de penetração do cordão de solda, apresentados no capítulo 2.

Para tanto, a primeira parte do estudo faz uma análise do comportamento destes diâmetros em função das potências utilizadas no ensaio. Em uma segunda etapa, é estudada a influência das variáveis T (tensão de aceleração) e I (corrente de feixe) no comportamento do diâmetro interno.

4.2.1 Medição do diâmetro interno e externo do orifício com uso de um analisador de imagem

Conforme descrito no capítulo 3, item em 3.5.2 “Medidas do diâmetro com o uso de um analisador de imagens”, as marcas deixadas pelo feixe de elétrons apresentam dois diâmetros, o diâmetro interno “Di”, definido como sendo o diâmetro do orifício gerado, e o diâmetro externo “De”, definido como sendo o diâmetro total da marca. No entanto, ainda não foi possível definir

qual destes dois diâmetros é o que representa o comportamento do diâmetro do feixe de elétrons. Assim, este item faz uma análise do comportamento destes diâmetros para poder definir qual dos dois diâmetros, diâmetro externo “De” ou diâmetro interno “Di”, deve ser utilizado para representar o real comportamento do diâmetro do feixe de elétrons.

Na tabela 4.3 estão apresentados os valores médios dos diâmetros externos e internos, em função do método de elevação de corrente, da tensão de aceleração e da corrente de feixe, obtidos com o uso do analisador de imagens, como já descrito no capítulo 3, item em 3.5.2 “Medidas do diâmetro com o uso de um analisador de imagens”.

Tabela 4.3 - Valores médios dos diâmetros internos e externos obtidos de cada corpo de prova em função das condições de ensaio.

Corrente de Feixe (mA)										
		10				50				
		“Di” (mm)	“De” (mm)	“Di” (mm)	“De” (mm)	“Di” (mm)	“De” (mm)	“Di” (mm)	“De” (mm)	
Método 1	Tensão (kV)	110	0.75	_____	0.76	_____	2.56	3.15	2.19	3.26
			Cp 21		Cp 22		Cp 3		Cp 17	
		140	0.43	0.95	0.39	0.96	1.71	3.86	1.98	3.86
			Cp 19		Cp 24		Cp 6		Cp 13	
Método 2	Tensão (kV)	110	0.81	_____	0.82	_____	2.44	3.81	2.55	3.63
			Cp 2		Cp 11		Cp 4		Cp 9	
		140	0.57	1.07	0.57	1.04	1.70	4.15	1.78	4.32
			Cp 5		Cp 16		Cp 12		Cp 20	
Método 3	Tensão (kV)	110	0.78	_____	0.85	_____	3.13	3.58	3.29	3.62
			Cp 10		Cp 18		Cp 1		Cp 7	
		140	0.47	1.07	0.49	0.99	3.21	4.27	3.23	4.18
			Cp 14		Cp 23		Cp 8		Cp 15	

A primeira análise que pode ser feita com os dados apresentados na tabela 4.3, é sobre as variâncias encontradas entre as amostras ensaiadas sob as mesmas condições. Para facilitar a análise destas variâncias, a tabela 4.4 apresenta o valor individual de cada diâmetro, como também o valor da variância (em mm^2) encontrada, em função das condições de ensaio.

Tabela 4.4 - Valores médios dos diâmetros internos “Di” e externos “De”, e da variância (entre parênteses) em função das condições de ensaio.

Corrente de Feixe (mA)											

Os dados apresentados na tabela 4.4 mostram que a variância encontrada entre as amostras para todos os ensaios realizados, variou de 0,0000 mm² até 0,0685 mm². Estes valores de variância encontrados, justificam a decisão de se utilizar apenas duas réplicas para cada condição de ensaio definida.

Observando os dados do diâmetro interno “Di” verifica-se que a variância ficou entre 0,0001 mm² e 0,0025 mm² para a potência de 1,1 kW (T=110 kV/I=10 mA), entre 0,0000 mm² e 0,0008 mm² para a potência de 1,4 kW (T=140 kV/I=10 mA), entre 0,0061 mm² e 0,0685 mm² para a potência de 5,5 kW (T=110 kV/I=50 mA) e entre 0,0002 mm² e 0,0032 mm² para a potência de 7,0 kW (T=140 kV/I=50 mA).

Já para os dados do diâmetro externo “De” as variâncias ficaram entre 0,0001 mm² e 0,0032 mm² para a potência de 1,4 kW (T=140 kV/I=10 mA), entre 0,0008 mm² e 0,0162 mm² para a potência de 5,5 kW (T=110 kV/I=50 mA) e entre 0,0000 mm² e 0,0145 mm² para a potência de 7,0 kW (T=140 kV/I=50 mA).

Através da análise dos dados apresentados acima, verifica-se que os menores valores de variância (até 0,0032 mm²) foram encontrados quando se utilizou baixos valores de potência (1,1 e 1,4 kW), enquanto que os maiores valores de variância (até 0,0685 mm²) foram encontrados quando se utilizou altos valores de potência (5,5 e 7,0 kW), o que mostra que a variância encontrada para altos valores de potência foi de até 20 (vinte) vezes o valor da variância encontrado quando se utilizou baixos valores de potência.

A explicação para o fato da variância entre as amostras serem menores quando se utiliza baixos valores de potência, baseia-se na interação entre as variáveis “corrente de feixe” e “Método de elevação de corrente”. Enquanto que para baixos valores de potências (1,1 e 1,4 kW) a corrente de feixe utilizada foi de 10 mA, para altos valores de potência (5,5 e 7,0 kW) a corrente de feixe foi de 50 mA. Assim, o que ocorre é que o feixe de elétrons com corrente de 50 mA tem mais dificuldade para se estabilizar em seu valor nominal, com os tempos definidos nos Métodos 1, 2 e 3 de elevação de corrente, do que um feixe com uma corrente de 10 mA. A

dificuldade de estabilização da corrente de feixe em seu valor nominal em função do tempo de elevação, já foi discutida no capítulo 3 item 3.4.3 “Formas de elevação da corrente de feixe”.

Outro comportamento encontrado que também justifica esta afirmação, é que as variâncias entre os valores de diâmetros internos “Di”, são decrescentes conforme se passa de um método de elevação de corrente para outro, quando a corrente de feixe utilizada é de 50 mA. Para a potência de 7,0 kW ($T=140$ kV/ $I=50$ mA) a variância foi de 0,0364 mm² para o Método 1, diminui para 0,0162 mm² para o Método 2, e diminui novamente para 0,0032 mm² quando se passou para o Método 3. Isto acontece porque o Método 1 apresenta a condição mais crítica de elevação de corrente de feixe, onde a elevação do valor da corrente até 50 mA é feita em apenas 2 (dois) segundos). Quando se utiliza o Método 2 a variância diminui porque o tempo de elevação da corrente passa a ser de 4 (quatro) segundos. O fato da corrente de feixe sendo elevada até o seu valor nominal em um tempo maior, permite que o feixe tenha um tempo maior para se estabilizar em seu valor nominal, o que acaba proporcionando menores variâncias entre os valores de diâmetros. A variância volta a diminuir quando se passa para o Método 3 porque, embora a corrente também seja elevada em 4 (quatro) segundos como no Método 2, a forma de elevação de corrente é realizada em duas etapas, conforme descrito no capítulo 3, item 3.4.3 “Formas de elevação da corrente de feixe”. Como no Método 3 a corrente permanece com seu valor nominal por 2 (dois) segundos, o Método 3 fornece um tempo maior que o tempo do Método 2, para que o feixe se estabilize, permitindo que se encontre menores variâncias entre as amostras.

Quando se faz a análise do diâmetro interno “Di” para a potência de 5,5 kW ($T=110$ kV/ $I=50$ mA), nota-se novamente que a maior variância foi encontrada quando se utilizou o Método 1 de elevação de corrente. No entanto, embora as variâncias encontradas para os Métodos 2 e 3 sejam menores que a do Método 1, a variância do Método 3 foi maior que a encontrada para o Método 2. Uma possível explicação para a ocorrência deste fato, pode estar na combinação entre a própria variância das amostras e a dificuldade na determinação da posição correta para se medir o diâmetro interno, conforme descrito no capítulo 3, item 3.5.3 “Medidas do diâmetro após a retirada do material expelido do orifício com o uso de um analisador de imagens”.

Como até o momento não é possível definir qual dos dois diâmetros, “De” ou “Di”, representa o valor real do diâmetro do feixe, a análise do comportamento destes diâmetros passa a ser realizada separadamente nos itens 4.2.2 e 4.2.3, respectivamente.

4.2.2 Análise do diâmetro externo

Para permitir uma melhor análise do comportamento do diâmetro externo “De” em função da potência utilizada no ensaio, os valores médios de “De” apresentados na tabela 4.4, são apresentados em forma de gráfico, através da figura 4.8.

Nesta figura pode-se ver que o diâmetro externo “De” cresce com o aumento da potência, independentemente do método de elevação de corrente de feixe, e que também há um crescimento, quando se passa do Método 1 para o Método 2 para todos os níveis de potência. Quando se passa do Método 2 para o Método 3, os valores de diâmetros médios permanecem praticamente inalterados para as potências de 1,4 e 7,0 kW, enquanto que ocorre uma queda no valor médio do diâmetro quando se utiliza a potência 5,5 kW.

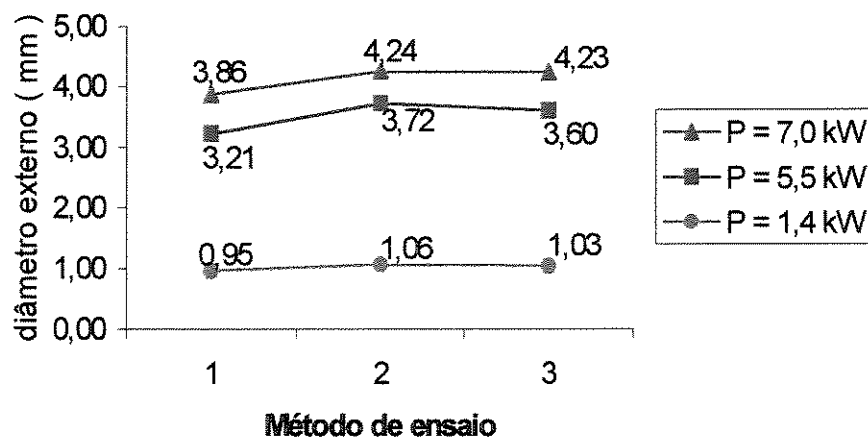


Figura 4.8 - Valores médios dos diâmetros externos (em milímetros) em função das condições de ensaio e da potência utilizada.

Este aumento do diâmetro externo “De” em função do aumento da potência, para um mesmo método de elevação de corrente, ocorre porque com uma potência maior há uma maior expulsão de material do interior do orifício. Com relação ao aumento do diâmetro “De” quando

se passa do Método 1 para o Método 2, o responsável por este aumento é a energia contida no feixe de elétrons. Neste caso, a energia do feixe do Método 2 tem o dobro da energia do feixe do Método 1. O aumento da energia faz também com que ocorra uma maior expulsão de material de dentro do orifício.

Outro fator que pode estar contribuindo para o aumento do diâmetro “De” quando se passa do Método 1 para o Método 2, é o tempo de elevação da corrente. Como já descrito no item 4.2.1, com um tempo de elevação maior, o feixe tem um tempo maior para se estabilizar com seu valor nominal de corrente, o que pode gerar um diâmetro maior. Este comportamento do aumento do diâmetro em função do aumento do tempo de exposição, também explicaria o fato dos diâmetros permanecerem praticamente inalterados quando se passa do Método 2 para o Método 3 para as potências de 1,4 e 7,0 kW, já que o tempo de elevação de corrente destes dois métodos é igual (4 segundos), embora a forma de elevação seja realizada de modo diferente, conforme descrito no capítulo 3 item 3.4.3 “Formas de elevação da corrente de feixe”.

No entanto, a hipótese do diâmetro do feixe permanecer inalterado quando se mantém o tempo de elevação da corrente, não explica o fato de haver uma queda no valor do diâmetro para a potência de 5,5 kW, quando se passa do Método 2 para o Método 3. O que pode ocorrer é que este tipo de comportamento pode ser diferente dependendo do valor da tensão de aceleração utilizado, já que a tensão de aceleração para as potências de 1,4 e 7,0 kW é de 140 kV, enquanto que para a potência de 5,0 kW o seu valor é de 110 kV. Como não houve material expelido quando foi utilizada a potência de 1,1 kW, onde a tensão de aceleração também é de 110 kV, não é possível confirmar esta hipótese, já que não há como comparar o comportamento entre potências que são definidas com um mesmo valor de tensão de aceleração. Para confirmar esta hipótese, seria necessário realizar um outro conjunto de ensaios, onde se utilizaria diferentes potências com um mesmo valor de tensão de aceleração.

Uma outra hipótese que poderia explicar a queda no valor do diâmetro para a potência de 5,5 kW, seria uma combinação entre variações do próprio processo de marcação do diâmetro no corpo de prova, com variações do processo de medida destes diâmetros. A soma destas duas variações podem ter levado o valor médio do diâmetro do Método 2 para um valor acima da

média real, enquanto que para o Método 3, o valor médio pode ter sido levado para um valor abaixo da média real.

Porém, com os dados disponíveis até o momento não é possível fazer nenhuma afirmação, mesmo comparando-se o comportamento do diâmetro apresentado na figura 4.8 (com dados obtidos com analisador de imagens) com o comportamento do diâmetro apresentado na figura 4.7 (com dados obtidos com projetor de perfil) para as potências de 5,5 e 7,0 kW. Na figura 4.7 o comportamento do diâmetro para a potência de 7,0 kW é igual ao comportamento para a potência de 5,5 kW, isto é, o diâmetro aumenta quando se passa do Método 1 para o Método 2, e se mantém constante quando se passa do Método 2 para o Método 3. Como na figura 4.8 o comportamento do diâmetro para a potência de 7,0 kW é exatamente igual ao apresentado na figura 4.7, seria possível supor que o comportamento do diâmetro para a potência de 5,0 kW apresentado na figura 4.8 seja igual ao comportamento apresentado na figura 4.7. No entanto, as medidas realizadas com o analisador de imagens tendem a ser mais precisas que as obtidas com o projetor de perfil, pois enquanto que com o primeiro instrumento foram realizadas quatro medidas de diâmetro para cada corpo de prova, com o segundo instrumento foi realizada apenas uma medida. Isto ocorreu porque não foi possível detectar com o projetor de perfil as irregularidades apresentadas pelas marcas.

Para se ter uma idéia das diferenças entre os dados obtidos pelo projetor de perfil, com os dados obtidos pelo analisador de imagens, para as potências de 5,5 e 7,0 kW (deve-se lembrar que não foi possível medir o diâmetro externo para as potências de 1,1 e 1,4 kW com o projetor de perfil), os mesmos estão apresentados na tabela 4.5.

Os dados apresentados nesta tabela mostram que, a diferença entre os valores de diâmetros externos “De” obtidos com o projetor de perfil e com o analisador de imagens, foi em valores absolutos de no máximo 9,4 %, e no mínimo 1,7 %. Pode-se ver também que as medidas obtidas com o analisador de imagens são maiores que as obtidas com o projeto de perfil para a potência de 5,5 kW, e que não apresentam nenhuma correlação com o método de elevação de corrente quando a potência é de 7,0 kW.

Tabela 4.5 - Comparação entre os valores médio dos diâmetros externos utilizando um projetor de perfil e um analisador de imagem.

Método	P = 5,5 kW			P = 7,0 kW		
	Projetor de perfil	Analisador de imagens	Diferença %	Projetor de perfil	Analisador de imagens	Diferença %
1	3.10	3.21	+3.55	3.60	3.86	+7.2
2	3.40	3.72	+9.4	4.50	4.24	-6.1
3	3.30	3.60	+9.1	4.30	4.23	-1.7

4.2.3 Análise do diâmetro interno

A realização das medidas do diâmetro interno “Di” é a que apresenta maiores problemas. As medidas foram realizadas conforme já descrito no capítulo 3 item 3.5.2 “Medidas do diâmetro com o uso de um analisador de imagens”, tendo como referência principal a figura 3.8. Através da análise das figuras 3.10 e 4.5, pode-se ver que o orifício gerado pelo feixe de elétrons apresenta uma seção transversal cônica, assim, o valor do diâmetro interno “Di” depende da posição escolhida para realizar a medida, variando para mais, se a medida for realizada acima da face do corpo de prova, ou então para menos, se a medida for realizada abaixo desta face. Esta variação também depende do ângulo de abertura do cone, quanto maior é este ângulo, maior é a diferença encontrada entre os valores do diâmetro interno “Di” para diferentes superfícies de medição. Para garantir que as medidas fossem realizadas sempre com o mesmo critério, definiu-se que a posição de medição seria aquela onde ocorre a transição entre a parte clara e a parte escura das fotos dos corpos de prova, conforme apresentado no capítulo 3 através da figura 3.9.

Para uma melhor visualização do comportamento do diâmetro interno “Di”, os valores médios destes diâmetros, listados na tabela 4.4 em função da tensão de aceleração, da corrente de feixe e do método de elevação de corrente, são apresentados em forma de gráfico na figura 4.9, em função do método de elevação de corrente e da potência.

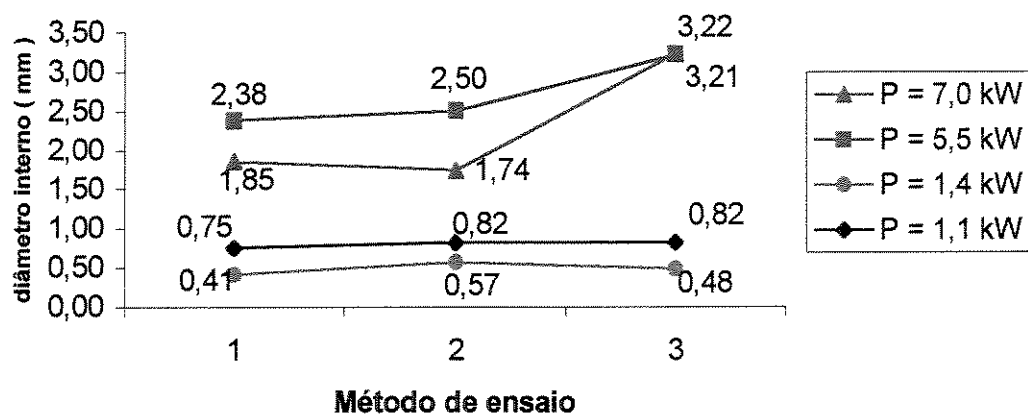


Figura 4.9 - Valores médios dos diâmetros internos (em milímetros) em função das condições de ensaio e da potência utilizada.

Da análise da figura 4.9, nota-se que existe uma variação do comportamento do diâmetro interno “Di” em função da potência utilizada. Para a potência de 1,4 kW o diâmetro tende a aumentar quando se passa do Método 1 para o Método 2, e depois tende a diminuir quando se passa do Método 2 para o Método 3. Para a potência de 1,1 kW, o diâmetro também tende a aumentar quando se passa do Método 1 para o Método 2, porém tende a se manter constante quando se passa do Método 2 para o Método 3. Para a potência de 5,5 kW, nota-se que o diâmetro apresenta um aumento constante quando se passa do Método 1 até o Método 3, enquanto que para a potência de 7,0 kW há uma redução do diâmetro quando se passa do Método 1 para o Método 2, e um aumento quando se passa do Método 2 para o Método 3.

A explicação encontrada para haver um comportamento distinto do diâmetro interno “Di” em função do método de elevação de corrente utilizado, para cada valor de potência, está no fato da dificuldade em se determinar a posição correta para realizar a medida deste diâmetro. Esta dificuldade provocou erros de medição, que acabaram gerando valores de diâmetros que não permitem fazer uma análise mais profunda e confiável à respeito do comportamento do diâmetro interno “Di”, caso a análise estude o comportamento em função do método de elevação de corrente para um mesmo valor de potência. Porém, se o objetivo desta análise for o de estudar o

comportamento em função da potência, a análise passará a ser válida, principalmente para baixos valores de potência, onde praticamente não existe a dificuldade em se identificar a transição entre um diâmetro e outro.

Fazendo-se uma análise comparativa entre o comportamento do diâmetro interno “Di” apresentado na figura 4.9, com o comportamento do diâmetro externo “De” apresentado na figura 4.8, verifica-se que o comportamento do diâmetro interno é diferente do apresentado pelo diâmetro externo. Para as potências de 5,5 e 7,0 kW, verifica-se que os valores dos diâmetros interno são próximos quando se utiliza os Métodos 1 e 2, e que estes valores são maiores quando se utiliza o Método 3, enquanto que para o diâmetro externo, os valores são próximos quando se utiliza os Métodos 2 e 3, e diminui quando se utiliza o Método 1. Para a potência de 1,4 kW o comportamento dos dois diâmetros é muito semelhante, já que com a baixa potência a penetração do feixe no corpo de prova é menor, fazendo com que menos material seja expelido e depositado ao redor do orifício.

A diferença de comportamento mais importante encontrada, é que, enquanto o diâmetro externo “De” sempre aumenta quando se aumenta a potência, para o diâmetro interno “Di” este aumento não ocorre sempre. Verifica-se que quando a potência passou de 1,1 kW ($T=110 \text{ kV/I} = 10 \text{ mA}$) para 1,4 kW ($T=140 \text{ kV/I} = 10 \text{ mA}$), e também quando passou de 5,5 kW ($T=110 \text{ kV/I} = 50 \text{ mA}$) para 7,0 kW ($T=140 \text{ kV/I} = 50 \text{ mA}$), o diâmetro interno diminuiu. Esta diminuição de diâmetro acontece porque a alteração de potência ocorreu via aumento de tensão de aceleração, mantendo-se o valor da corrente de feixe constante.

Este comportamento de diminuição do diâmetro com o aumento da tensão, mantendo-se a corrente de feixe constante, é melhor visualizado quando apresentado de forma gráfica através das figuras 4.10, 4.11 e 4.12, que mostram a variação do diâmetro interno em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe, para cada método de elevação de corrente. Nestas figuras, pode-se ver que o diâmetro “Di” ensaiado com tensão de 110 kV (representado pela linha vermelha) é sempre maior do que quando é ensaiado com a tensão de 140 kV (representado pela linha azul), para qualquer método de elevação de corrente, menos em uma única condição, que é

quando se utiliza a corrente de feixe de 50 mA com o Método 3. Provavelmente, deve ter ocorrido erros de leitura dos valores de diâmetro para esta condição de ensaio.

Para verificar se o provável erro de leitura, foi na medição do diâmetro com tensão de aceleração de 110 ou de 140 kV, faz-se uma análise da variação do diâmetro “Di” para um mesmo valor de tensão de aceleração, em função do aumento da corrente de 10 mA para 50 mA. Verifica-se que este aumento apresenta um comportamento relativamente uniforme, quando se utiliza a tensão de 110 kV. Neste caso, os valores de aumento de diâmetro foram de: 3,17 vezes para o Método 1, de 3,05 vezes para o Método 2 e de 3,9 vezes para o Método 3. Já para a tensão de 140 kV, este comportamento mostra-se variável, com valores de aumento de diâmetro de: 4,5 vezes para o Método 1, 3,05 para o Método 2 e de 6,71 vezes para o Método 3. Como o maior aumento de diâmetro encontrado foi de 6,71 vezes para a tensão de 140 kV com corrente de feixe de 50 mA para o Método 3, e como este valor é aproximadamente o dobro dos valores encontrados, provavelmente foi nesta condição ($T=140 \text{ kV}/I=50 \text{ mA}$) que pode ter havido erros de medida de diâmetro.

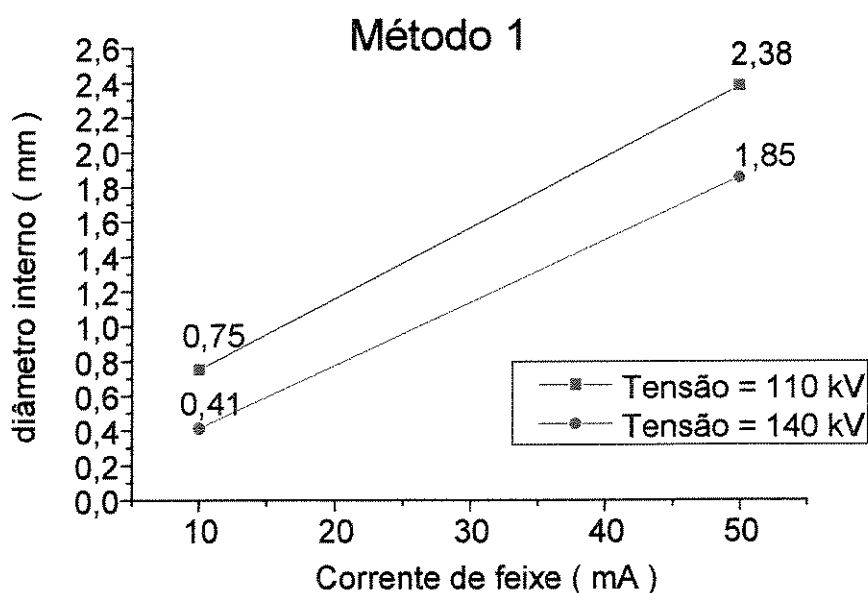


Figura 4.10 - Diâmetro interno em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração para o Método 1.

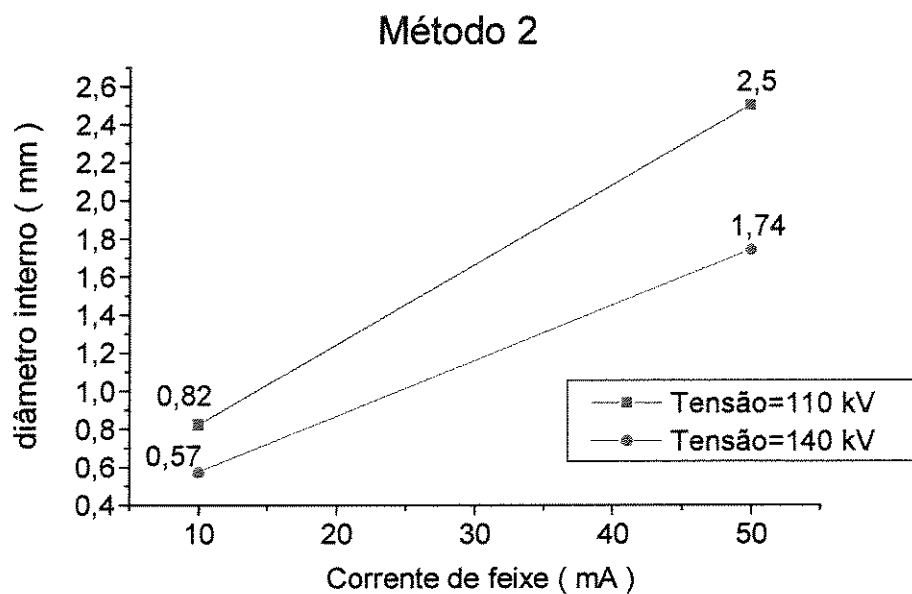


Figura 4.11 – Diâmetro interno em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração para o Método 2.

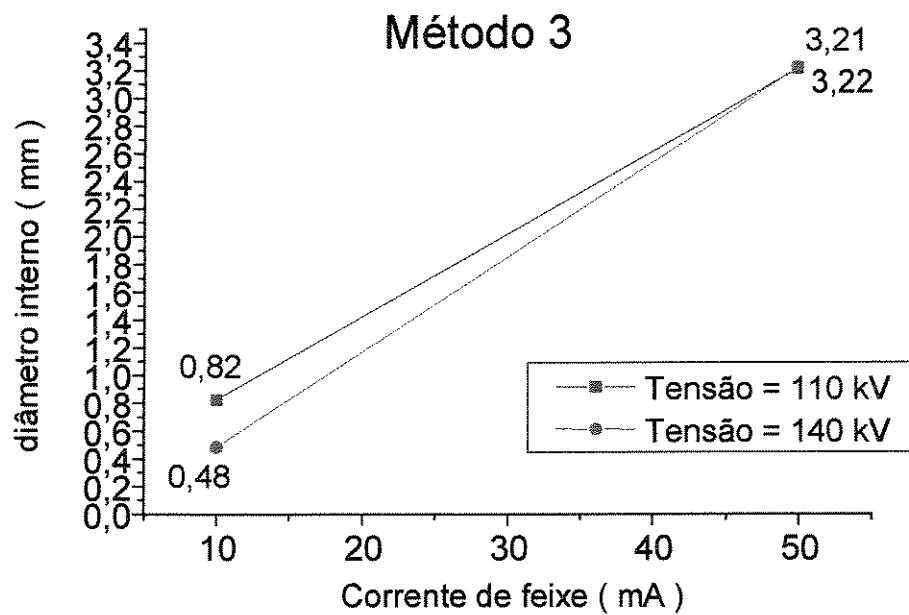


Figura 4.12 – Diâmetro interno em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração para o Método 3.

Este comportamento apresentado pelo diâmetro interno “Di” através das figuras 4.10, 4.11 e 4.12, é igual ao comportamento do diâmetro do feixe apresentado por Sandstrom et al. (1970) através da figura 4.13, onde vê-se que para valores de tensão constante (10 kV, 15 kV, 20 kV e 25 kV), o diâmetro do feixe aumenta com o aumento da corrente de feixe, e que este mesmo diâmetro diminui quando se aumenta a tensão de aceleração.

Comparando-se os comportamentos apresentados pelo diâmetro externo “De” e pelo diâmetro interno “Di”, chega-se a primeira constatação importante deste trabalho, de que é o diâmetro interno “Di” que a literatura se refere, quando aborda o valor do diâmetro do feixe de elétrons para uso nos modelos matemáticos, que relacionam a penetração do cordão de solda em função dos parâmetros do equipamento utilizado e das propriedades físicas do material a ser soldado.

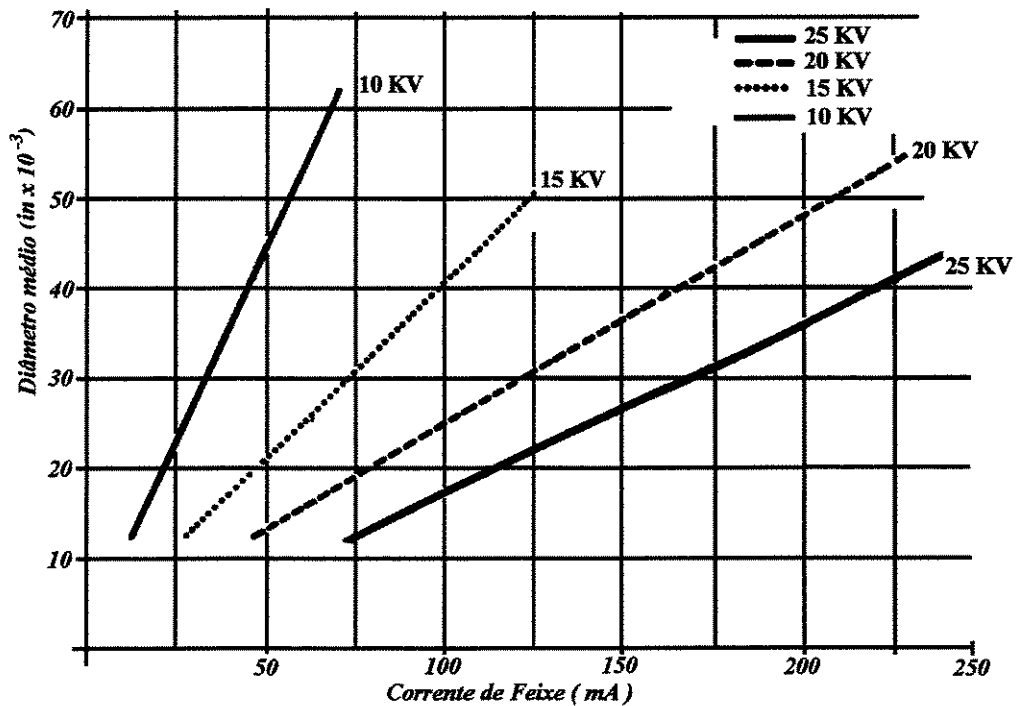


Figura 4.13 - Diâmetro do feixe em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração.
(Sandstrom et al., 1970).

No entanto, conforme já descrito no capítulo 3 item 3.5.3 “Medidas do diâmetro após a retirada do material expelido do orifício com o uso de um analisador de imagens”, a medida do diâmetro interno “Di” pode estar sujeita à erros devido ao fato de haver material depositado na superfície do corpo de prova. Conforme já descrito neste item, esta pode ser uma das razões para que os valores de diâmetro interno “Di” encontrados para a corrente de feixe 50 mA, tenham sido iguais para as tensões de aceleração de 110 e 140 kV, no Método 3. Para tentar solucionar este problema, o excesso de material na superfície dos corpos de prova foi retirado, e procedeu-se a uma nova análise do diâmetro interno, como será mostrado no próximo item.

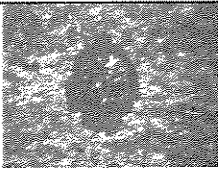
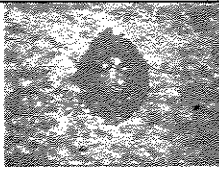
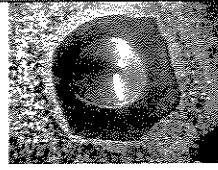
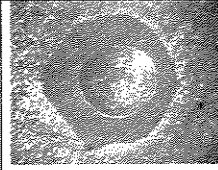
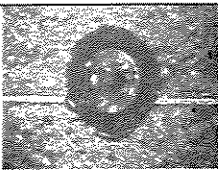
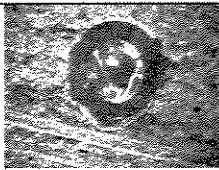
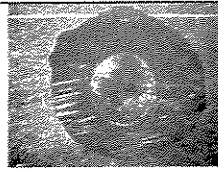
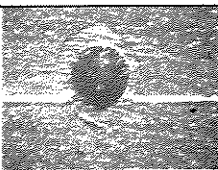
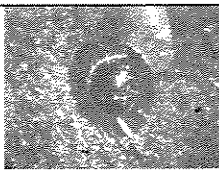
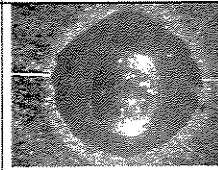
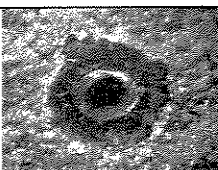
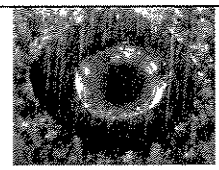
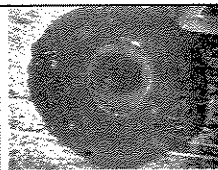
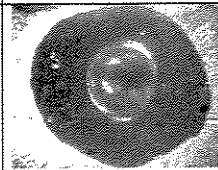
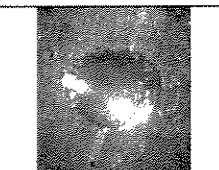
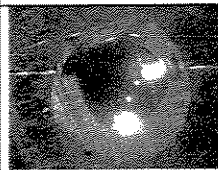
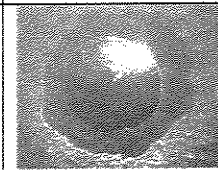
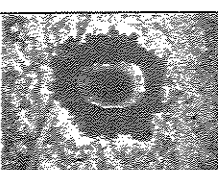
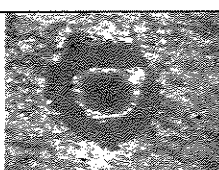
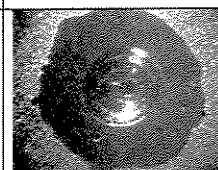
4.2.4 Análise visual do diâmetro interno após retirada do excesso de material

Após a retirada do material que foi expulso do orifício, conforme descrito no capítulo 3 item 3.5.3 “Medidas do diâmetro interno após a retirada do material expelido com o uso de um analisador de imagens”, foram tiradas fotos dos corpos de prova, que estão apresentadas na tabela 4.6, em função da corrente de feixe, da tensão de aceleração e do Método de elevação de corrente.

Nestas fotos, as marcas maiores e mais escuras referem-se ao diâmetro externo “De”, enquanto que a marca interna refere-se ao diâmetro interno “Di”. A primeira observação facilmente realizada através destas fotos, é a definição bem precisa do diâmetro interno deixado pelo feixe de elétrons após a retirada de material, quando compara-se estas marcas, com as marcas que não tiveram material retirado, apresentadas na tabela 4.1, onde é difícil a definição do ponto correto de medição.

Através da análise visual das fotos apresentadas na tabela 4.6, verifica-se que nos três métodos de elevação de corrente de feixe utilizados, com a condição de corrente de feixe de 50 mA, o diâmetro interno diminui em relação ao diâmetro externo quando a tensão de aceleração aumentou de 110 kV para 140 kV.

Tabela 4.6 - Marcas do feixe de elétrons nos corpos de prova após retirada do excesso de material.

			Corrente de Feixe (mA)			
			10		50	
Método 1	Tensão (kV)	110				
			21	22	3	17
		140				
			19	24	6	13
Método 2	Tensão (kV)	110				
			2	11	4	9
		140				
			5	16	12	20
Método 3	Tensão (kV)	110				
			10	18	1	7
		140				
			14	23	8	15

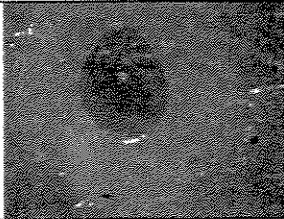
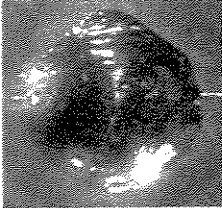
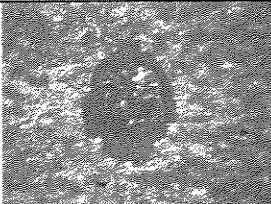
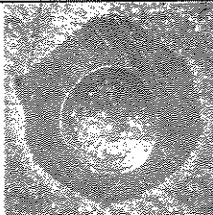
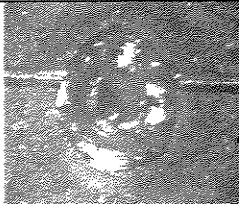
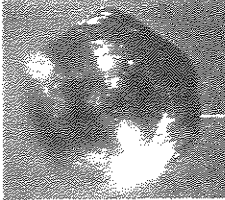
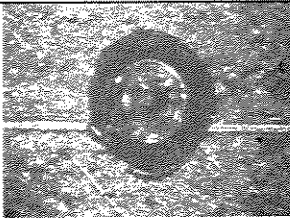
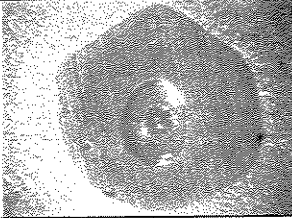
Este comportamento de diminuição do diâmetro quando se aumenta a tensão de aceleração, está de acordo com o comportamento apresentado por Sandstrom et al. (1970), através da figura 4.13, já discutido no item anterior. Quando se faz a análise com a corrente de feixe de 10 mA, a comparação visual fica mais difícil de ser realizada, em função do pequeno volume de material expelido, principalmente quando são utilizados os Métodos 1 e 2.

A definição precisa do diâmetro interno em relação ao diâmetro externo, não é verificada quando se utiliza o Método 3, com corrente de feixe = 10 mA e tensão de aceleração = 110 kV. Neste caso, a foto apresenta apenas um diâmetro, ao passo que, com a mesma condição de corrente de feixe e de tensão de aceleração para os Métodos 1 e 2, os dois diâmetros estão bem definidos.

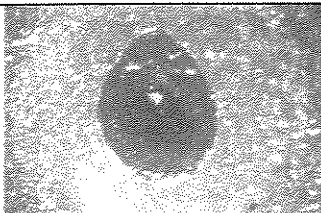
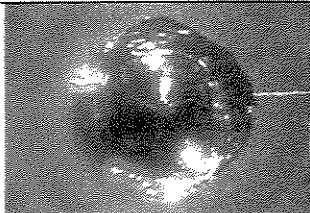
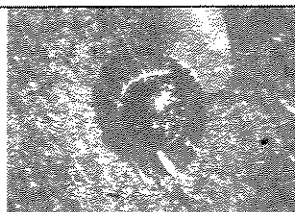
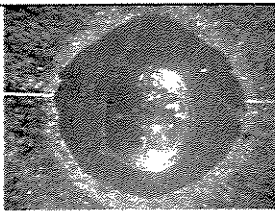
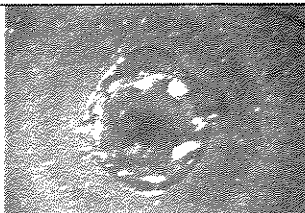
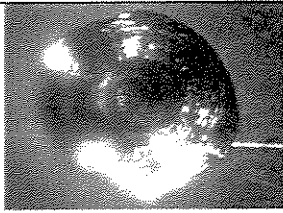
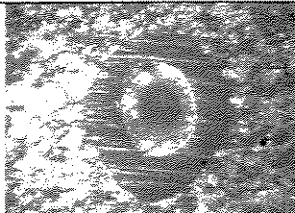
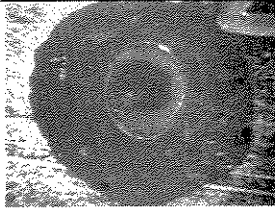
A constatação da existência de dois diâmetros para os Métodos 1 e 2 com corrente de feixe de 10 mA, só foi possível de ser feita após a retirada do excesso de material. Este fato pode ter ocorrido devido a potência do feixe neste caso (1,1 kW) ser pequena em relação ao tempo de exposição do feixe dos Métodos 1 e 2, assim, não há tempo suficiente para que o feixe possa realizar uma marca que represente o seu diâmetro real. Este comportamento será melhor analisado no item 4.2.4, onde será feita a análise dimensional do diâmetro.

Para que se possa obter uma melhor visualização e comparação entre as diferenças das marcas deixadas pelo feixe de elétrons, antes e após a retirada de material, as fotos para cada condição de ensaio e método utilizados, são mostradas na tabela 4.7.

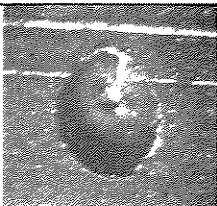
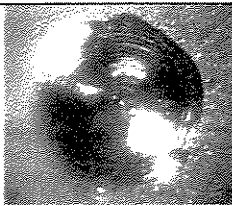
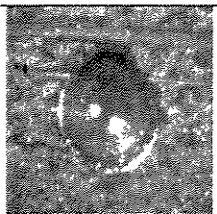
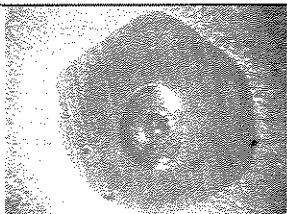
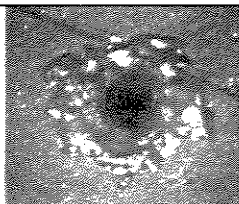
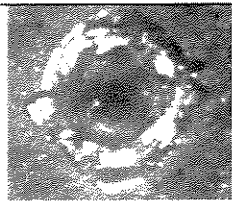
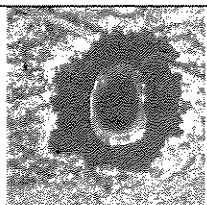
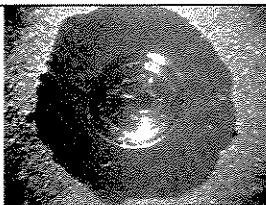
Tabela 4.7 - Comparação entre as marcas deixadas pelo feixe de elétrons antes e depois da retirada do excesso de material.

Método 1			Corrente de Feixe (mA)	
			10	50
Tensão (kV)	110			
		Antes		
				
		Depois		
	140			
		Antes		
				
		Depois		

(Continuação Tabela 4.7)

Método 2		Corrente de Feixe (mA)			
		10		50	
Tensão (kV)	110				
		Antes			
					
		Depois			
Tensão (kV)	140				
		Antes			
					
		Depois			

(Continuação Tabela 4.7)

			Corrente de Feixe (mA)	
			10	50
Método 3	Tensão (kV)	110		
			Antes	
				
			Depois	
	Tensão (kV)	140		
			Antes	
				
			Depois	

A análise das fotos da tabela 4.7, mostra que para o Método 1 existe uma relação diferente entre as marcas, para cada condição de ensaio. As fotos realizadas depois da retirada de material para a condição de 10 mA de corrente de feixe e 110 kV de tensão de aceleração, mostram que existem dois diâmetros na marca, fato este que não foi possível verificar com as fotos realizadas antes da retirada de material. No centro da marca obtida depois da retirada de material é possível visualizar um pequeno diâmetro cujo fundo é levemente brilhante, que é o diâmetro interno “Di”, e ao redor deste diâmetro existe uma mancha escura. A linha de transição entre a parte escura com a parte brilhante mais externa, define o diâmetro externo “De”. Enquanto que para a

condição de corrente de feixe de 50 mA, com os valores de tensão de 110 e 140 kV, o diâmetro interno aparenta ser visualmente maior antes da retirada de material, para a condição de 10 mA e 140 kV, o diâmetro interno aparenta ser maior depois da retirada de material.

Quando se utiliza o Método 2, os comentários são os mesmos descritos para o Método 1 para corrente de feixe de 10 mA e tensões de aceleração de 110 e 140 kV. Isto é, existe uma definição melhor dos dois diâmetros na marca após a retirada de material para a condição de 10 mA e 110 kV, e o diâmetro interno aparenta ser maior depois da retirada de massa para a condição de 10 mA e 140 kV. Quando se utiliza a corrente de feixe de 50 mA, mais uma vez o diâmetro interno aparenta ser maior antes da retirada de material com tensão de aceleração de 110 kV, enquanto que para a tensão de aceleração de 140 kV não parece haver diferença no diâmetro interno antes e depois da retirada de material.

Já para o Método 3, os comentários são diferentes dos apresentados para os Métodos 1 e 2. Para corrente de feixe de 10 mA e tensão de aceleração de 110 kV existe um único diâmetro tanto antes como depois da retirada de material, que vem confirmar em parte, a hipótese de que o tempo de exposição do feixe para os Métodos 1 e 2, não é suficiente para permitir que o feixe deixe uma marca que represente com exatidão o seu diâmetro real, para esta condição de ensaio. Com corrente de feixe de 10 mA e tensão de aceleração de 140 kV, não parece haver diferença no diâmetro interno antes e depois da retirada de material. Quando se utiliza corrente de feixe de 50 mA e tensão de aceleração de 110 kV, o diâmetro interno aparenta ser bem maior antes da retirada de material, enquanto que para 140 kV o diâmetro interno aparenta ser maior depois da retirada de material.

Como pode ser notado através da comparação visual do diâmetro interno, antes e depois da retirada de material, descrito nos parágrafos anteriores, cada método de elevação de corrente apresentou um comportamento diferente em função das condições de ensaio. No entanto, pode-se ver também, através das fotos apresentadas na tabela 4.7, que a definição correta do diâmetro interno do feixe, fica mais fácil de ser realizada quando se retira o material que foi expelido para fora do orifício.

4.2.5 Análise dimensional do diâmetro interno após retirada do excesso de material

Neste item, faz-se um estudo do comportamento do diâmetro interno “Di” do feixe de elétrons, após a retirada do excesso de material que foi expelido para fora do orifício, através da análise dimensional das marcas deixadas nos corpos de prova para todas as condições de ensaio utilizadas. A dificuldade em se realizar esta análise, é que especificamente para a potência de 1,1 kW ($T=110$ kV/ $I=10$ mA), há o surgimento de dois diâmetros após a retirada do excesso de material, conforme já descrito no item 4.2.4 “Análise visual do diâmetro interno após retirada do excesso de material”, enquanto que antes desta retirada, havia apenas um diâmetro. Surge assim a dúvida à respeito de qual destes dois diâmetros deve ser utilizado, para se estudar o comportamento do diâmetro interno “Di”, após a retirada de material.

Para solucionar este problema decidiu-se fazer uma análise em paralelo do comportamento dos diâmetros dos corpos de prova 2, 11, 21 e 22, apresentados nas fotos da tabela 4.6, para a potência de 1,1 kW com os Métodos 1 e 2. Uma primeira análise considera que o diâmetro a ser estudado, é o diâmetro correspondente ao diâmetro externo da marca, enquanto que uma segunda análise considera o diâmetro interno destas marcas. Para facilitar a análise, os dados referentes ao diâmetro externo e ao diâmetro interno, estão representados através das tabelas 4.8a e 4.8b, e também em forma de gráfico através das figuras 4.14a e 4.14b, respectivamente.

Através da análise do comportamento do diâmetro do feixe de elétrons em função do método de elevação de corrente apresentado pela figura 4.14a, pode-se ver que este comportamento é diferente dependendo do nível de potência utilizado. Para as duas potências mais altas, 5,5 kW e 7,0 kW, o diâmetro apresenta um crescimento constante quando se passa do Método 1 até o Método 3. Para as duas potências mais baixas, 1,1 kW e 1,4 kW, o diâmetro tende a crescer apenas quando se passa do Método 1 para o Método 2, e tende a ficar constante quando se passa do Método 2 para o Método 3. Isto sugere que há uma estabilização no valor do diâmetro, mesmo com o aumento do tempo de elevação da corrente de feixe. No entanto, este comportamento de tendência à estabilização não ocorre para a potência de 1,1 kW, quando se considera que o diâmetro a ser estudado é o diâmetro mais interno da marca, conforme mostra a figura 4.14b. Neste caso, o diâmetro apresenta um crescimento constante, com taxa de

crescimento de 7,8 % quando se passa do Método 1 para o Método 2, e de 52,7 % quando se passa do Método 2 para o Método 3.

Tabela 4.8a - Valores médios de diâmetro para cada corpo de prova e para condição de ensaio, considerando o diâmetro externo das marcas na condição de $I=10$ mA e $T=110$ kV.

			Corrente de Feixe (mA)			
			10		50	
			diâmetro (mm)	diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)
Método 1	Tensão (kV)	110	0.75	0.77	1.81	1.85
			0.76		1.83	
		140	0.50	0.51	1.75	1.43
			0.51		1.58	
Método 2	Tensão (kV)	110	0.85	0.83	2.13	1.97
			0.84		2.05	
		140	0.50	0.55	1.77	1.87
			0.53		1.82	
Método 3	Tensão (kV)	110	0.81	0.86	2.25	2.34
			0.84		2.30	
		140	0.50	0.53	2.09	2.03
			0.52		2.06	

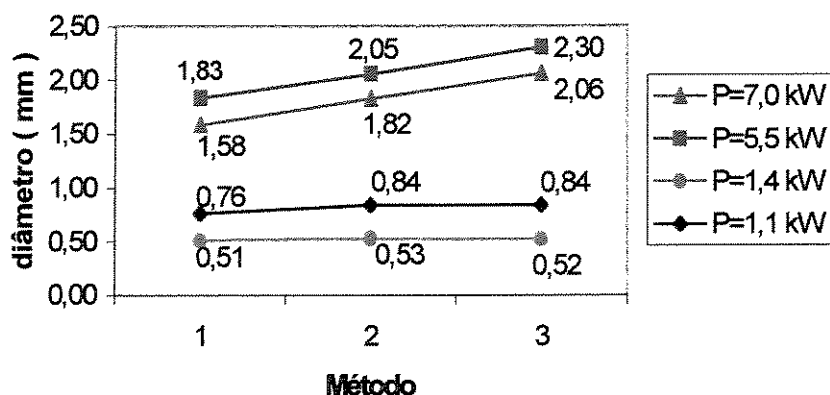


Figura 4.14a - Comportamento do diâmetro do feixe de elétrons em função da potência e método utilizado, considerando o diâmetro externo das marcas na condição de $I=10$ mA e $T=110$ kV.

Tabela 4.8b - Valores médios de diâmetro para cada corpo de prova e para condição de ensaio, considerando o diâmetro interno das marcas na condição de $I=10$ mA e $T=110$ kV.

			Corrente de Feixe (mA)			
			10		50	
			diâmetro (mm)	diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)	Diâmetro (mm)
Método 1	Tensão (kV)	110	0.51	0.46	1.81	1.85
			0.49		1.83	
		140	0.50	0.51	1.75	1.43
			0.51		1.58	
Método 2	Tensão (kV)	110	0.57	0.52	2.13	1.97
			0.55		2.05	
		140	0.50	0.55	1.77	1.87
			0.53		1.82	
Método 3	Tensão (kV)	110	0.81	0.86	2.25	2.34
			0.84		2.30	
		140	0.50	0.53	2.09	2.03
			0.52		2.06	

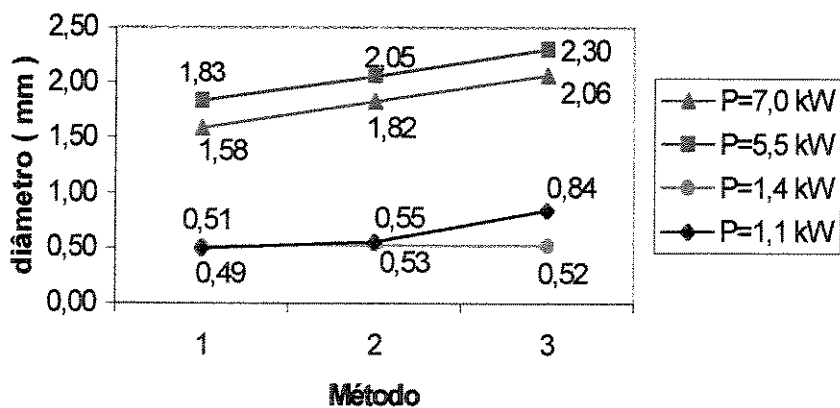


Figura 4.14b Comportamento do diâmetro do feixe de elétrons em função da potência e método utilizado, considerando o diâmetro externo das marcas na condição de $I=10$ mA e $T=110$ kV.

A razão para que o diâmetro do feixe apresente uma tendência a estabilização para baixas potências e um crescimento para altas potências, pode ser explicada pelo estudo da forma de elevação de corrente de feixe realizada no capítulo 3, onde decidiu-se que seriam utilizados dois métodos diferentes de elevação.

Para as potências de 5,5 kW e 7,0 kW a corrente de feixe utilizada foi de 50 mA, e a tensão de aceleração foi de 110 kV e 140 kV, respectivamente. Como este valor de corrente de feixe é alta, presume-se que os Métodos 1 e 2 não permitem que o feixe tenha tempo suficiente para deixar uma marca que represente o seu diâmetro real. No Método 2 o tempo de elevação de corrente (4 segundos) é maior que o do Método 1 (2 segundos), assim o Método 2 permite a obtenção de um diâmetro maior que o do Método 1. No entanto, como o Método 2 utiliza a elevação gradual do valor da corrente, o tempo continua sendo ainda insuficiente para gerar uma marca que corresponda ao diâmetro real do feixe. Como no Método 3 a elevação de corrente ocorre primeiro de forma gradual (2 segundos) e depois permanece com um valor constante por mais 2 segundos, o diâmetro encontrado para este método tende a ser maior do que o do Método 2, porque o tempo que o feixe permanece com o seu valor nominal é maior (2 segundos), e suficiente para permitir que o feixe consiga deixar uma marca que represente o seu valor real.

O fato do tempo de elevação de corrente ser insuficiente para deixar uma marca que represente o diâmetro real do feixe ocorre também quando a potência é muito baixa, como pode ser visto através da figura 4.14b. Nesta figura pode-se ver que para a potência de 1,1 kW ($T=110 \text{ kV}/I=10 \text{ mA}$) o diâmetro do feixe apresenta um crescimento constante, enquanto que para a potência de 1,4 kW o diâmetro tende a se manter constante para os Métodos 2 e 3. Neste caso (potência de 1,1 kW), embora o tempo de elevação de corrente seja suficiente para que a corrente de feixe se estabilize em seu valor nominal, é a energia contida no feixe que não é suficiente para gerar uma marca que represente o valor real do diâmetro. Isto pode ser comprovado quando se analisa o comportamento do diâmetro, através das fotos dos diâmetros depois da retirada de material apresentadas na tabela 4.6, e da distribuição de energia dentro do feixe apresentada na figura 4.4. Como a energia do feixe está mais concentrada no centro da marca, para baixos valores de potência um tempo menor de elevação de corrente (2 s no Método 1) permite que apenas a área de maior densidade de energia consiga realizar uma marca de

diâmetro. Com o aumento do tempo de elevação (4 s no Método 2), áreas com menor densidade de energia também conseguem deixar suas marcas, até que se atinja um tempo (4s no Método 3 com parte da elevação da corrente gradual) que seja suficiente para que todas as áreas de concentração de energia consigam deixar uma única marca de diâmetro no bloco de tungstênio, conforme mostrado na foto da tabela 4.6 com o Método 3, com $T=110$ kV e $I=10$ mA.

A estabilização do diâmetro do feixe pode ser comprovada, quando se faz a análise do comportamento deste diâmetro para as potências mais baixas (1,1 kW e 1,4 kW), através da figura 4.14a. Neste caso, a corrente de feixe utilizada é de 10 mA, e o tempo de elevação da corrente de feixe utilizado no Método 2 (4s) é suficiente para que o feixe deixe uma marca que represente o seu valor real, já que os diâmetros encontrados no Método 2 são estatisticamente iguais aos encontrados no Método 3, ou seja, o diâmetro do feixe tende a se estabilizar mesmo aumentando-se o tempo e/ou a forma de elevação da corrente de feixe.

Diante do exposto nos parágrafos anteriores pode-se constatar que o melhor método para a definição do diâmetro do feixe, é o Método 3 de elevação de corrente, pois este método permite ao feixe, independentemente da potência utilizada ser baixa (1,1 e 1,4 kW) ou alta (5,5 e 7,0 kW), ter tempo suficiente para gerar uma marca com um diâmetro correspondente ao valor real. Constata-se também, que os valores corretos dos diâmetros para a potência de 1,1 kW são aqueles apresentados na tabela 4.8a, isto é, no caso da potência de 1,1 kW deve-se considerar o diâmetro mais externo da marca como o diâmetro que deve ser analisado para se estudar o comportamento do diâmetro do feixe.

Para verificar realmente se o comportamento do diâmetro do feixe, com os dados listados tabela 4.8a e mostrados através da figura 4.14a, está compatível com o apresentado por Sandstrom et al. (1970), estes dados estão apresentados em forma de gráficos através das figuras 4.15, 4.16 e 4.17.

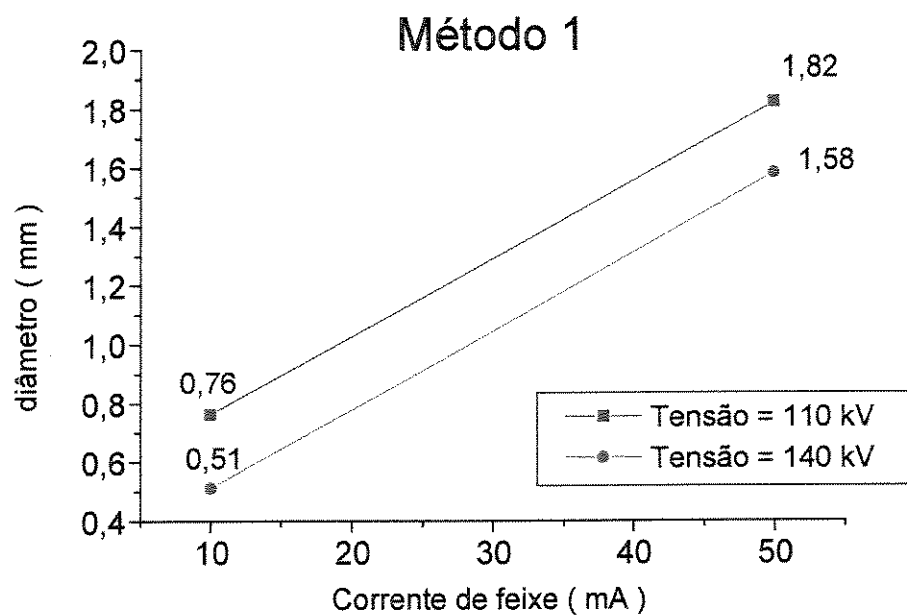


Figura 4.15 - Valores médios de diâmetro em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe para o Método 1.

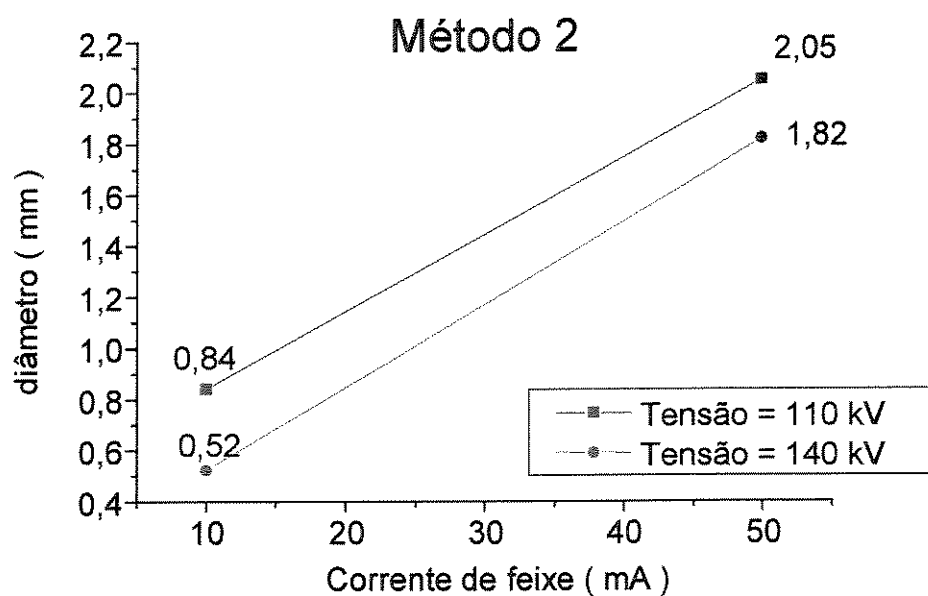


Figura 4.16 - Valores médios de diâmetro em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe para o Método 2.

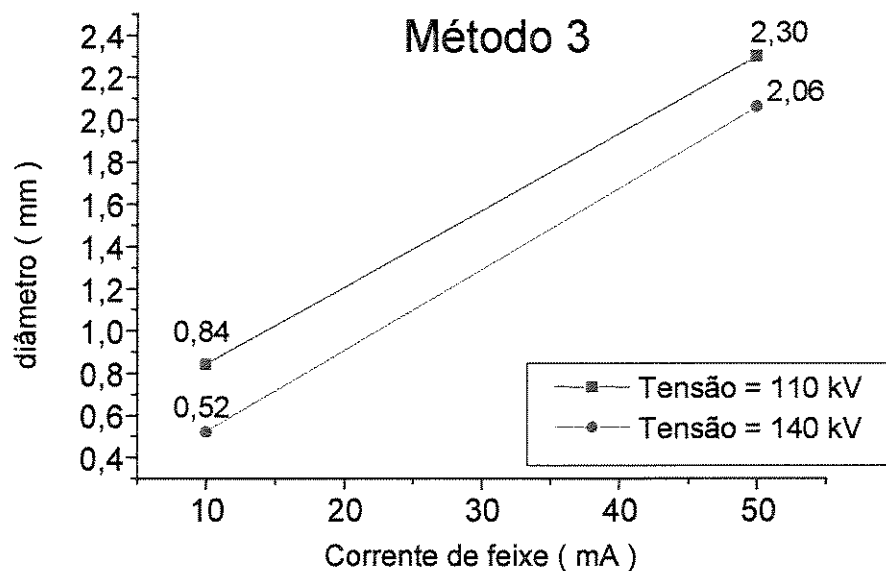


Figura 4.17 - Valores médios de diâmetro em função da tensão de aceleração e da corrente de feixe para o Método 3.

Como pode ser visto através da análise dos gráficos apresentados pelas figuras 4.15, 4.16 e 4.17, os três métodos estudados de elevação de corrente apresentaram um comportamento semelhante ao apresentado por Sandstrom et al. (1970)(através da figura 4.13), que mostra que o diâmetro do feixe diminui quando se eleva a tensão de aceleração para um mesmo valor de corrente de feixe, fato este já discutido neste capítulo no item 4.2.3.

Analisando a variação do diâmetro em função da corrente de feixe e da tensão de aceleração, verifica-se que o aumento do diâmetro é uniforme, independentemente do método de elevação de corrente utilizado. Aumentando-se a corrente de feixe de 10 mA para 50 mA para uma tensão de aceleração de 140 kV, ocorre um aumento de diâmetro de 3,1 vezes para o Método 1, de 3,5 vezes para o Método 2, e de 3,96 vezes para o Método 3. Com os mesmos valores de corrente de feixe, 10 mA e 50 mA, porém com tensão de aceleração de 110 kV os aumentos de diâmetro são de: 2,4 vezes para o Método 1; 2,44 vezes para o Método 2 e de 2,74 vezes para o Método 3. Fazendo a análise mantendo-se a corrente de feixe constante em 10 mA e diminuindo a tensão de aceleração de 140 kV para 110 kV, os aumentos de diâmetro são de: 1,49 vezes para o Método 1, 1,61 vezes para o Método 2, e também de 1,61 vezes para o Método 3.

Com a corrente de feixe de 50 mA, e passando a tensão de aceleração de 140 kV para 110 kV os aumentos no diâmetro são de: 1,15 vezes para o Método 1, de 1,12 vezes para o Método 2 e de 1,12 vezes para o Método 3. Comparando estes dados, com os dados de crescimento de diâmetro obtidos através da análise do diâmetro antes da retirada do material que foi expelido do orifício, nota-se que os valores de crescimento encontrados depois da retirada do material são mais uniformes que os encontrados antes da retirada de material.

4.2.6 Análise de variância do diâmetro após a retirada do excesso de material.

A comprovação de que o diâmetro do feixe tende a se estabilizar com o aumento do tempo de elevação de corrente, pode também ser vista através da análise dos dados de variância obtidas entre as amostras, para a condição mais crítica do ensaio (T= 140 kV/ I= 50 mA), mostrados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Variância entre os valores médios de diâmetro para cada corpo de prova e para condição de ensaio.

			Corrente de Feixe (mA)			
			10		50	
			diâmetro(mm)	diâmetro(mm)	diâmetro(mm)	diâmetro(mm)
Método 1	Tensão (kV)	110	0.75	0.77	1.81	1.85
			0,0002 mm ²		0,0008 mm ²	
		140	0.50	0.51	1.75	1.43
			0,0001 mm ²		0,0512 mm ²	
Método 2	Tensão (kV)	110	0.85	0.83	2.13	1.97
			0,0002 mm ²		0,0128 mm ²	
		140	0.50	0.55	1.77	1.87
			0,0013 mm ²		0,0050 mm ²	
Método 3	Tensão (kV)	110	0.81	0.86	2.25	2.34
			0,0013 mm ²		0,0041 mm ²	
		140	0.50	0.53	2.09	2.03
			0,0005 mm ²		0,0018 mm ²	

Enquanto a variância encontrada para ensaios realizados com corrente de aceleração de 10 mA variou entre 0,0001 mm² e 0,0013 mm², a variância para os ensaios com corrente de feixe de 50 mA foi maior, variando entre 0,0008 mm² e 0,0512 mm². Analisando o comportamento da variância para tensão de aceleração = 140 kV e corrente de feixe de 50 mA (condição mais crítica de ensaio), verifica-se que o aumento no tempo de elevação de corrente, provoca uma diminuição no valor da variância. Assim, a variância passou de 0,0512 mm² com o Método 1 (tempo de elevação de corrente = 2s), para 0,0050 mm² com o Método 2 (tempo de elevação de corrente = 4s), e 0,0018 mm² com o Método 3 (tempo de elevação de corrente = 4s em duas etapas). Como a variância diminui com o aumento do tempo, isto prova que o diâmetro do feixe tende a se estabilizar com um tempo de elevação de corrente de feixe maior.

Pode-se assim chegar a segunda constatação deste trabalho que é sobre a forma correta de se medir o diâmetro interno “Di” da marca deixada pelo feixe de elétrons. Esta medição deve ser realizada após a retirada do material que foi expelido para fora do orifício. Deve-se retirar o material que é expelido para fora do orifício, para evitar que a medição do diâmetro seja realizada em um plano diferente ao da face do corpo de prova.

Além disso, é possível estabelecer qual é o método de elevação de corrente ideal para realizar este tipo de ensaio. Deve-se utilizar um método de elevação de corrente de feixe que permita que o feixe de elétrons possa permanecer com o seu valor nominal de corrente por um período suficiente, permitindo a geração de uma marca que represente o valor real de seu diâmetro, como o Método 3.

4.2.7 Proposição de um método para se medir o diâmetro da marca do feixe de elétrons

Baseado nos resultados obtidos é proposto um método para a medição do diâmetro da marca do feixe de elétrons que atinja os objetivos definidos no início deste trabalho, que é o de ter um método simples, rápido, confiável, que possa ser facilmente utilizado em um ambiente de produção, e que possa ser aplicado nos modelos matemáticos de previsão de penetração do cordão de solda apresentados no capítulo 2 por Elmer & Giedt & Eagar (1990) através das

equações 2.4a, 2.4b e 2.4c, com o intuito de se diminuir o tempo necessário de definição dos parâmetros de soldagem para se atingir uma determinada penetração.

O método proposto para se medir o diâmetro da marca do feixe de elétrons é:

- Utilizar como corpo de prova um bloco, ou barra de tungstênio, com um diâmetro mínimo de 15 mm, para evitar que a marca deixada pelo feixe cubra a maior parte da área da face do corpo de prova, já que foi encontrado diâmetros de até 4,3 mm. O comprimento não deve ser menor 30 mm;
- Usinar as faces dos corpos de prova, mantendo-se o paralelismo entre as faces o menor possível, para garantir que a superfície de ensaio do corpo de prova esteja perpendicular ao feixe de elétrons;
- Utilizar o Método 3 de elevação de corrente de feixe, com um tempo de elevação de corrente suficiente para permitir que ocorra a estabilização do diâmetro do feixe. Neste método a corrente de feixe é elevada até o seu valor nominal em duas etapas, em uma primeira etapa a corrente é elevada de forma gradual de zero até o seu valor nominal, e em uma segunda etapa o valor da corrente é mantido constante;
- Retirar o excesso do material que foi expelido do orifício, garantindo que o comprimento inicial do corpo de prova não seja alterado. O objetivo desta retirada de material é o de assegurar que a medida do diâmetro seja realizada o mais próxima possível da face do corpo de prova para evitar erros de medida;
- Realizar as medidas do diâmetro interno com um analisador de imagens que permita fazer macrografias, tomando o cuidado para realizar as medidas em quatro pontos diferentes para minimizar erros provenientes da forma irregular da marca.

Capítulo 5

Conclusões

Com base nos dados obtidos, discutidos e analisados no capítulo 4, pode-se chegar as seguintes conclusões:

5.1 Método proposto

- O método proposto neste trabalho para se medir o diâmetro da marca do feixe de elétrons é simples de ser executado, e pode ser facilmente utilizado em modelos matemáticos para previsão da penetração de cordões de solda realizados por uma máquina de solda por feixe de elétrons.
- O método de elevação da corrente de feixe mais apropriado para gerar uma marca do feixe de elétrons em um bloco de tungstênio é o Método 3, onde a elevação de corrente é executada em duas etapas. Na primeira etapa a corrente de feixe é elevada de forma gradual, enquanto que na segunda etapa é mantida constante.
- O tempo total de 4 (quatro) segundos, utilizado pelo Método 3 para se elevar a corrente de feixe de 0 mA até o valor de 50 mA, foi suficiente para gerar uma marca com um diâmetro que represente o seu valor real. Para um tempo menor, o valor do diâmetro interno é menor do que o real, tanto para baixa potência como para alta potência.

- É o diâmetro interno da marca gerada pelo feixe de elétrons que deve ser utilizado nos modelos matemáticos de previsão de penetração do cordão de solda. Deve-se ressaltar que o material que foi expelido para fora do orifício gerado tem que ser retirado do corpo de prova para que a medida do diâmetro seja precisa.

5.2 Formato do diâmetro do feixe

- A marca do feixe de elétrons apresenta um formato elíptico e irregular, ao passo que a literatura descreve o formato como sendo circular, através do uso do termo “diâmetro” do feixe.

- O formato elíptico da marca gerada pelo feixe de elétrons varia em função da corrente de feixe. A relação entre os semi-eixos maior e o semi-eixo menor da elipse foi de 25% para corrente de feixe de 10 mA e tensão de aceleração de 110 kV obtida com o Método 3, e de 5% para corrente de feixe de 50 mA e tensão de aceleração de 110 kV obtida com o Método 1.

- As marcas deixadas pelo feixe de elétrons apresentam normalmente dois diâmetros, um diâmetro interno e um diâmetro externo. O diâmetro interno é gerado através da criação de um orifício no corpo de prova, devido a maior densidade de energia no centro do feixe, enquanto que o diâmetro externo surge devido a deposição do material que foi expelido, em torno do orifício.

- A única condição que gera marcas com um diâmetro único, é quando se utiliza ao mesmo tempo baixos valores de tensão de aceleração e de corrente de feixe. No caso estudado, esta condição corresponde aos valores de 110 kV (tensão de aceleração) e de 10 mA (corrente de feixe).

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

ANDREWS HI-TEC CORPORATION . Disponível na Internet. <http://www.ahtc.com/history.htm>
28 Dec 1998.

BURGARDT, P. Welding Variable Effects on Weld Shape in Electron Beam Welding of Steels, *Key Engineering Materials*, vols 69&70, p. 269-328, Switzerland 1992.

DILTHEY, U. & BÖHM, ST. & DOBNER, M. & TRÄGER, G. Comparability, Reproducibility and Portability of the Electron Beam Technology Using New Tools of the Diabem Measurement Device, *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde*, vol. 39, n.3, p 124-129, 1997.

DILTHEY, U. & WEISER, J.. Investigation of EB Characteristics and their Influences on the Weld Shape, *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde*, vol. 39, n.2, p 89-98, 1997.

DIXON, R. D. Welding: Theory and Practice, USA, Elsevier Science Publishers B. V., 1990. Chapter 8: Electron-beam Welding. p.: 235 -264.

ELMER, J. W. & GIEDT, W. H. & EAGAR, T.W. The Transition from Shallow to Deep Penetration during Electron Beam Welding, *Welding Journal, Supplement* , p. 167-s-176-s, May 1990.

- FATHI, M. & LAMBRECHT, M. Ebflatsy: A Fuzzy Logic System to Calculate and Optimize Parameters for na Electron Beam Welding Machine, *Fuzzy Sets and Systems*, 69, p. 3-13, 1995.
- FRITZ, D. Focussing of High Energy Density Beams, *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde*, vol. 39, n.4, p 172-178, 1997.
- GALRÃO, C. H. Q. , TREVISAN, R. E. Estudo da penetração do cordão de solda por feixe de elétrons com insumo de calor constante. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15, 1999, Águas de Lindóia: Anais ... Águas de Lindóia: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1999(a). 01 CD-Rom.
- GALRÃO, C. H. Q. , TREVISAN, R. E. Estudo do ajuste do foco do feixe em uma máquina de solda por feixe de elétrons. In.: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 25, 1999, Belo Horizonte: Anais... Belo Horizonte: Associação Brasileira de Soldagem, 1999 (b). 01 CD-Rom.
- HASHIMOTO, T. & MATSUDA, F. An Equation for Calculating Optimum Welding Condition in Electron Beam Welding, *Transactions of National Research Institute for Metals (Japan)*, v. 9, n. 1, p. 48-53, 1967.
- HICKEN, G. K. & GIEDT, W. H. & BENTLEY, A. E. Correlation of Joint Penetration with Electron Beam Current Distribution, *Welding Journal, Supplement* , p.69-s-75-s, March 1991.
- LAFLAMME, G. R. & POWERS, D.E. Diagnostic Device Quantifies, Defines Geometric Characteristics of Electron Beams, *Welding Journal*, p.33-40, October 1991.
- LAMBRAKOS, S. G. & METZBOWER, E. A. & MILEWSKI, J. & LEWIS, G. & DIXON, R. & KORZEKWZ, D. Simulation of Deep Penetration welding of stainless Steel Using

- Geometric Constraints Based on Experimental Information, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol 3 (5), p. 639-648, October 1994.
- LUBIN, B. T. Dimensionless Parameters for the Correlation of Electron Beam Welding Variables, *Welding Journal, Supplement*, p.140-s - 144-s, March 1968.
- MLADENOV, G. & PETROV, P. Using Computers to Determine Electron Beam Welding Parameters, *Welding and Cutting*, 3, p. 10-12, 1993.
- PERIODIC TABLE – WEBELEMENTS: tungsten: physical property. Disponível na Internet. <http://www.webelements.com/webelements/elements/text/phys/W.html>, 09 June 2000.
- POWERS, D. E. Nonvacuum Electron Beam Welding Enhances Automotive Manufacturing, *Welding Journal*, p. 59-62, November 1997.
- SANDSTROM, D. J. & BUCHEN, J. F. & HANKS, G. S. On the Measurement and Interpretation and Application of Parameters Important to Electron Beam Welding, *Welding Journal, Supplement*, p. 293-s-300-s, July 1970.
- TONG, H. & GIEDT, W. H. Depth of Penetration During Electron Beam Welding, *Journal of Heat Transfer*, p. 155-163, May 1971.

