

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROPULSOR
ELETROMAGNÉTICO – MAGNETOPLASMADINÂMICO PARA APLICAÇÕES EM
SOLDAGEM E CORTE

RICHARD THOMAS LERMEN

Físico

Porto Alegre

2006

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

Desenvolvimento e Implementação de um Propulsor Eletromagnético –
Magnetoplasmadinâmico para Aplicações em Soldagem e Corte

Richard Thomas Lermen

Físico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, com parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2006

II

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROPULSOR
ELETROMAGNÉTICO – MAGNETOPLASMA DINÂMICO PARA APLICAÇÕES EM
SOLDAGEM E CORTE

DISSERTAÇÃO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

por
RICHARD THOMAS LERMEN
Físico

2006

III

Esta Dissertação foi julgada adequadamente para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Guerra Machado (DEMEC/PPGEM – UFRGS)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi.

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques.

Prof. Dr. Francisco José Kiss.

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. IVAN GUERRA MACHADO, pela orientação e confiança depositada durante a realização deste trabalho.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro.

Aos colegas de Laboratório, nas pessoas do Prof. Dr. José A. E. Mazzaferro, dos engenheiros Roger N. Verástegui e Luciano V. Lopes, ao graduando Douglas de P. Santos e ao técnico Luis H. M. Zaniratti que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos demais amigos e amigas que também colaboraram, de alguma forma, para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Marisa E. V. Lermen e Joseli A. Lermen pelo apoio.

As minhas irmãs e tia, Graciela Lermen, principalmente a Jaqueline Lermen e Mara T. Varaschim pelo companheirismo e apoio.

RESUMO

O estudo e desenvolvimento das tecnologias envolvidas nos propulsores eletromagnéticos, os quais são utilizados na propulsão de foguetes e espaçonaves, são recentes e extremamente complexos. Devido a isso, poucas referências atuais foram encontradas para a realização deste trabalho.

Esse trabalho tem como objetivo a prospecção de novas tecnologias nos processos de soldagem e corte de materiais metálicos. Essa prospecção realizou-se através da construção e estudo do dispositivo eletromagnético conhecido como propulsor magnetoplasmadinâmico (“Magnetoplasmadynamic Thruster – MPDT”), o qual é capaz de ionizar um gás, formando um fluxo de plasma com temperaturas elevadas.

Dois dispositivos eletromagnéticos, MPDT-1 e MPDT-2, foram construídos no Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas – LS&TC da UFRGS. Para ambos, foram realizados testes de funcionamento analisando a influência das variáveis físicas (intensidade de corrente elétrica, posição relativa entre os eletrodos, ângulo da extremidade do catodo, entre outras) no jato de plasma expulso para fora da câmara dos dispositivos. Com base nos resultados obtidos para os testes de funcionamento dos dispositivos, os quais apresentaram influências significativas das variáveis físicas no jato de plasma, foram escolhidos os parâmetros que melhor se adequavam na realização de soldagem e corte. As soldagens realizadas com o MPDT-1 apresentaram uma grande oxidação no metal de solda, a qual foi evitada com a adição de um bocal de gás de proteção no MPDT-2 e gás de purga. Os cortes, para ambos os dispositivos, apresentaram falhas devido ao jato de plasma não expulsar o metal fundido.

Contudo, o propulsor eletromagnético pode ser aplicado no desenvolvimento de novas tecnologias de soldagem e corte, porém novos estudos devem ser realizados para encontrar melhores parâmetros e assim conseguir soldagem e corte com excelentes qualidades.

ABSTRACT

The study and development of technologies involved in the electromagnetic thruster, that are used in the propulsion of rockets and spaceships, are new and extremely complex. Due to this, a few present references were found to the accomplishment of this work.

This work has as objective the search of new technologies in the process of welding and cutting of metallic materials. This prospection happened through the construction and study of an electromagnetic device known as Magnetoplasmadynamic Thruster – MPDT, which is capable to ionize a gas, forming a plasma flow with high temperatures.

Two electromagnetic devices, MPDT-1 and MPDT-2, were built at Welding & Related Techniques Laboratory, at Center of Technology of Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). In both, there were carried out functional tests analyzing the influence of the physics variables (electric current intensity, relative position between the electrodes, angle of cathode tip, among other things) on the plasma jet expelled of the device chamber.

With base at the results obtained for functional tests of the devices, which had presented significant influences of the physics variables on plasma jet, were chosen the parameters that better adjusted for welding and cutting. The weldings accomplished with the MPDT-1 presented a great oxidation of weld filet, which was avoid with the addition of a nozzle of shielding gas on MPDT-2 and gas of purge. For both devices, the cuts presented imperfections due to plasma jet not to eject the casting metal.

However, the electromagnetic device – MPDT could be applied on the development of new technologies of welding and cutting, but news studies must be carried out to find better parameters and then obtain welds and cuts of excellent quality.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação esquemática de um magnetoplasma dinâmico (MPDT).
- Figura 2.** Acelerador eletromagnético elementar.
- Figura 3.** Transferência da força magnética para o fluxo de gás através das colisões dos elétrons.
- Figura 4.** Modelo de um acelerador MPDT.
- Figura 5.** Modelo idealizado para análise do MPDT – corrente radial uniforme.
- Figura 6.** Modelo idealizado para análise do MPDT – corrente radial em um catodo com extremidade cônica.
- Figura 7.** Modelo idealizado para análise do acelerador MPDT – corrente uniforme axial.
- Figura 8.** Modelo idealizado para análise do MPDT – modelo híbrido.
- Figura 9.** Movimento dos elétrons em um MPDT com campo magnético externo aplicado.
- Figura 10.** Configurações de alguns MPDTs.
- Figura 11.** Desenho esquemático do dispositivo MPDT-1.
- Figura 12.** MPDT-1 fixado no corpo de uma tocha TIG.
- Figura 13.** Dispositivo de deslocamento automático onde foi fixado o MPDT-1 e as chapas.
- Figura 14.** Esquema mostrando a posição relativa X entre os eletrodos (catodo e anodo) e algumas dimensões em mm.
- Figura 15.** Desenho esquemático do dispositivo MPDT-2.
- Figura 16.** Esquema mostrando a posição relativa X entre os eletrodos (catodo e anodo) e algumas dimensões em mm.
- Figura 17.** Desenho esquemático do aparato experimental desenvolvido para medir a força propulsora fornecida pelo MPDT-2.
- Figura 18.** Desenho esquemático do MPDT-2 conectado a uma bobina.
- Figura 19.** (a) Parte frontal da bobina com as dimensões do raio interno e externo e (b) parte lateral com as dimensões dos comprimentos (distâncias em mm).
- Figura 20.** Esquema representando o aparato experimental utilizado na realização dos processos de soldagem e corte dos materiais com o MPDT-2.
- Figura 21.** Representação dos fluxos dos gases e centralização da chapa de aço.
- Figura 22.** Imagens dos feixes de plasma para o primeiro experimento.
- Figura 23.** Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 15$ mm (**Figura 14**).

Figura 24. Comprimento do feixe de plasma expulso para o exterior da câmara em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 15$ mm (**Figura 14**).

Figura 25. Imagens dos feixes de plasma para o segundo experimento.

Figura 26. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 10$ mm (**Figura 14**).

Figura 27. Comprimento do feixe de plasma expulso para o exterior da câmara em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 10$ mm (**Figura 14**).

Figura 28. Vista de uma secção da chapa de aço inoxidável com 1 mm de espessura soldada através do MPDT-1, onde “A” é a superfície superior e “B” é a superfície inferior da chapa. Esta imagem refere-se ao teste 2, o qual apresenta os dados experimentais na **Tabela 1**.

Figura 29. Vista de uma secção da chapa de aço inoxidável com 0,7 mm de espessura soldada através do MPDT-1, onde “A” é a superfície superior e “B” é a superfície inferior da chapa. Esta imagem refere-se ao teste 7, o qual apresenta os dados experimentais na **Tabela 1**.

Figura 30. Resultados dos testes de corte através do MPDT-1. “A” refere-se ao teste 1, “B” ao teste 3 e “C” ao teste 4; os parâmetros de corte são apresentados na **Tabela 1**.

Figura 31. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 5$ mm e cone na extremidade do catodo de 60° .

Figura 32. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 10$ mm e cone na extremidade do catodo de 60° .

Figura 33. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 15$ mm e cone na extremidade do catodo de 60° .

Figura 34. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 5$ mm e cone na extremidade do catodo de 45° .

Figura 35. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 10$ mm e cone na extremidade do catodo de 45° .

Figura 36. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 15$ mm e cone na extremidade do catodo de 45° .

Figura 37. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 5$ mm e cone na extremidade do catodo de 30° .

Figura 38. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 10$ mm e cone na extremidade do catodo de 30° .

Figura 39. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 15$ mm e cone na extremidade do catodo de 30° .

Figura 40. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 5$ mm e vazão de gás na câmara de 5 l/min.

Figura 41. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 5$ mm e vazão de gás na câmara de 7 l/min.

Figura 42. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 5$ mm e vazão de gás na câmara de 10 l/min.

Figura 43. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 5$ mm e vazão de gás na câmara de 16 l/min.

Figura 44. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 10$ mm e vazão de gás na câmara de 5 l/min.

Figura 45. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 10$ mm e vazão de gás na câmara de 7 l/min.

Figura 46. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 10$ mm e vazão de gás na câmara de 10 l/min.

Figura 47. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 10$ mm e vazão de gás na câmara de 16 l/min.

Figura 48. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 15$ mm e vazão de gás na câmara de 5 l/min.

Figura 49. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 15$ mm e vazão de gás na câmara de 7 l/min.

Figura 50. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 15$ mm e vazão de gás na câmara de 10 l/min.

Figura 51. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 15$ mm e vazão de gás na câmara de 16 l/min.

Figura 52. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 5 l/min.

Figura 53. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 7 l/min.

Figura 54. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 10 l/min.

Figura 55. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 16 l/min.

Figura 56. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 5 l/min.

Figura 57. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 7 l/min.

Figura 58. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 10 l/min.

Figura 59. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 16 l/min.

Figura 60. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 5 l/min.

Figura 61. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 7 l/min.

Figura 62. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 10 l/min.

Figura 63. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 16 l/min.

Figura 64. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição X = 5 mm

Figura 65. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição X = 10 mm

Figura 66. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 45° e posição X = 5 mm

Figura 67. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 45° e posição X = 10 mm.

Figura 68. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição X = 5 mm.

Figura 69. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição X = 10 mm

Figura 70. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição relativa X entre os eletrodos de 5 mm.

Figura 71. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição relativa X entre os eletrodos de 10 mm.

Figura 72. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição relativa X entre os eletrodos de 5 mm.

Figura 73. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição relativa X entre os eletrodos de 10 mm.

Figura 74. Vista da superfície superior (1.1) e inferior (1.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 1).

Figura 75. Vista da superfície superior (2.1) e inferior (2.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 2).

Figura 76. Vista da superfície superior (3.1) e inferior (3.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 3).

Figura 77. Vista da superfície superior (4.1) e inferior (4.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 4).

Figura 78. Vista da superfície superior (5.1) e inferior (5.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 5).

Figura 79. Vista da superfície superior (6.1) e inferior (6.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 6).

Figura 80. Macrografias das seções transversais dos cordões de solda dos testes 1, 2, 3, 4, 5 e 6 realizados com o dispositivo MPDT-2, onde os parâmetros são apresentados na **Tabela 3**.

Figura 81. Vista lateral (C-1) e superior (C-2) do corte de uma chapa de aço realizado com o dispositivo MPDT-2.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados experimentais dos testes de soldagem e corte utilizando o dispositivo MPDT-1.

Tabela 2. Dados experimentais para os testes realizados com campo magnético externo.

Tabela 3. Dados experimentais dos testes de soldagem utilizando o dispositivo MPDT-2.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_0 – Velocidade acústica do íon.
- B – Campo Magnético induzido.
- B_θ – Campo magnético azimutal.
- B' – Campo magnético axial (externo – bobina).
- c – Calor específico.
- D – Campo elétrico deslocado.
- E – Campo elétrico.
- f_V – Densidade de força devido a viscosidade do gás.
- f_B – Densidade de força.
- F_c – Força de propulsão (contribuição de extração – “pumping”).
- F_T – Força de propulsão eletrotérmica.
- F_z – Força propulsora na direção z.
- H – Campo magnético.
- I – Intensidade de corrente elétrica.
- j – Densidade de corrente elétrica.
- j_H – Contribuição da corrente Hall.
- j_r – Decaimento dos íons.
- J – Corrente elétrica total.
- \dot{m} – Taxa do fluxo de gás (vazão do gás).
- p – Pressão do gás.
- r_a – Raio do anodo.
- r_c – Raio do catodo.
- T – Temperatura absoluta do gás.
- t – Tempo.
- u – Velocidade do fluxo de gás dentro da câmara do acelerador.
-
- σ – Condutividade elétrica do gás (escalar). Viscosidade.
- ρ – Densidade do gás.
- ϕ_v – Calor absorvido pelo processo de condução no gás.
- ϕ_t – Dissipação de energia pela viscosidade do gás.
- ϕ_r – Perda de energia radiante por unidade de volume.

μ_o – Permeabilidade magnética do meio (vácuo).

μ – Permeabilidade magnética do meio.

γ – Relação do calor específico.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1 INTRODUÇÃO	01
2 REVISÃO DA LITERATURA	02
2.1 Histórico	03
2.2 Propulsores eletromagnéticos	04
2.2.1 Modelo multidimensional dependente do tempo	06
2.2.2 Propulsor Magnetoplasmadinâmico – MPDT	08
2.2.2.1 Propulsão eletromagnética nos MPDTs	08
2.3 Processos de Soldagem e Corte dos Materiais	17
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	19
3.1 Materiais e métodos para o MPDT-1	19
3.2 Materiais e métodos para o MPDT-2	22
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30
4.1 Resultados obtidos com o MPDT-1	30
4.1.1 Funcionamento do MPDT-1	30
4.1.2 Aplicação do MPDT-1 em processos de soldagem e corte	34
4.2 Resultados obtido com o MPDT-2	36
4.2.1 Funcionamento do MPDT-2	36
4.2.2 Aplicação do MPDT-2 em processos de soldagem e corte	67
5 CONCLUSÃO	73
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	75
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias em processos de soldagem e corte é uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas – LS&TC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Como prospecção de novas tecnologias, tem-se a construção e estudo de um dispositivo eletromagnético com a finalidade de produzir soldagem e corte de materiais.

Este dispositivo conhecido como magnetoplasmadinâmico (“Magnetoplasmadynamic Thruster – MPDT”) vem sendo estudado e utilizado como motor eletromagnético para propulsão de foguetes e espaçonaves, pela Princeton University e outras instituições /1/. Esse dispositivo caracteriza-se por uma geometria coaxial constituída por um catodo central e um anodo cilíndrico em forma de câmara, os quais são isolados eletricamente. Um gás é injetado através de orifícios gerando um fluxo na câmara, onde é ionizado através da passagem pela descarga elétrica entre os eletrodos (catodo e anodo), gerada por uma fonte de energia com dispositivo de alta frequência. Através desse plasma (gás ionizado) surge uma densidade de corrente radial, a qual atravessa o gás em direção ao catodo. Esta corrente no catodo gera um campo magnético circunferencial, o qual interage com a densidade de corrente aparecendo uma força eletromagnética, chamada de “força de Lorentz” ($\vec{j} \times \vec{B}$), a qual acelera as partículas e é também responsável pela expulsão do gás ionizado para fora da câmara. Um esquema do magnetoplasmadinâmico – MPDT com a representação das linhas de densidade de corrente é mostrado na **Figura 1** /2 – 4/.

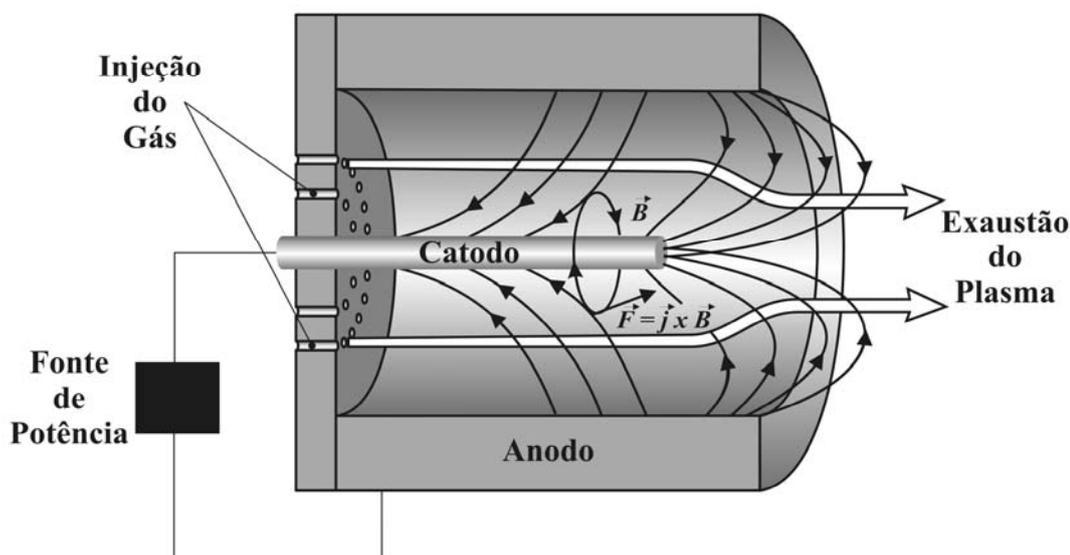


Figura 1. Representação esquemática de um magnetoplasmadinâmico (MPDT) /1/.

Este trabalho tem como principal objetivo a construção e estudo do dispositivo eletromagnético MPDT para ser aplicado em soldagem e corte de materiais. Em princípio, testes de funcionamento e análises comportamentais do MPDT foram realizadas, e, sequencialmente, realizou-se soldagem e corte de materiais.

2 – REVISÃO DA LITERATURA

O desenvolvimento da ciência do plasma permitiu grandes aplicações na engenharia, na física e no desenvolvimento tecnológico. Entre essas aplicações está o desenvolvimento dos propulsores elétricos, os quais são classificados em propulsores eletrotérmicos, propulsores eletrostáticos e propulsores eletromagnéticos. Os propulsores eletrotérmicos como “resistojets” e “arcjets” caracterizam-se pelo fato do gás injetado ser aquecido eletricamente e expandido através de uma câmara. Os propulsores eletrostáticos como os propulsores iônicos (“Ion Thrusters”) são aqueles em que o gás injetado é acelerado ionizando as partículas pela direta aplicação do campo elétrico. Os dispositivos como propulsor magnetoplasmadinâmico (“Magnetoplasmadynamic Thruster – MPDT”), propulsor de plasma pulsado (“Pulsed Plasma Thruster – PPT”) e propulsor de efeito Hall (“Hall Effect Thruster”) são classificados como propulsores eletromagnéticos, onde o fluxo de gás ionizado é acelerado pela interação do campo magnético interno ou externo com a corrente elétrica dirigida através desse fluxo /2, 5, 6/.

Outra aplicação da ciência do plasma foi na tecnologia de materiais, onde surge a confecção de tochas de plasma para soldagem e corte de materiais. Também aplica-se essa ciência em outras áreas tais como: fusão nuclear, a qual está relacionada ao desenvolvimento de reatores nucleares; química de plasma que está relacionada às transformações químicas; e a área de plasma espacial, a qual relaciona-se com a compreensão da física existente nas estrelas, nos quasares e outros /5/.

Embora a ciência do plasma possua inúmeras aplicações, as principais para o desenvolvimento deste trabalho estão relacionadas com a construção de dispositivos propulsores eletromagnéticos e tochas para soldagem e corte. As aplicações práticas dos propulsores elétricos não estão relacionadas somente com a propulsão espacial, mas também com dispositivos de aplicação nas áreas de soldagem e corte de materiais, tendo como exemplo o propulsor eletrotérmico – “magnetoplasmadynamic arcjet” /7/.

Serão descritos a seguir as tecnologias de propulsão eletromagnética, os processos de soldagem e corte; e também um breve histórico dos mesmos.

2.1 – Histórico

O estudo e o desenvolvimento dos processos de soldagem e corte, e também dos propulsores elétricos são contemporâneos, ou seja, ambos desenvolveram-se no final do século XIX e realmente ganharam um impulso a partir dos anos 60, em virtude dos grandes avanços tecnológicos decorrentes, principalmente, das pesquisas aeroespaciais, onde os desafios quanto ao desempenho de materiais e sistema cresciam na mesma medida da chamada “guerra fria” /2, 8, 9/.

Em 1926, Henry M. Hobart e Philip K. Devers foram os precursores dos processos de soldagem TIG e MIG, onde utilizaram os gases hélio e argônio, respectivamente, para proteger o arco elétrico e a poça de fusão, ambos formados por eletrodos não-consumíveis (“Tungsten Inert Gas – TIG”) e eletrodos consumíveis com alimentação contínua (“Metal Inert Gas – MIG”). Na época não foram considerados economicamente viáveis /8/.

Russel Meredith e V.H. Pauleka (E.U.A.), em 1941, desenvolveram o processo TIG, então chamado de “Heliarc”, pois utilizava o hélio como gás de proteção. O processo de soldagem arco plasma (Plasma Arc Welding – PAW) foi desenvolvido por Robert M. Gage em 1957. Também neste mesmo período foi desenvolvido o processo de corte plasma /8/.

Por volta de 1906, por Robert H. Goddard, surge a idéia de aplicações dos conceitos físicos em propulsão elétrica. Em 1911, o russo Konstantin Tsiolkovskiy propõem uma idéia de aplicação conceitual semelhante, a qual refere-se ao uso da eletricidade para acelerar partículas em um dispositivo para foguetes. Posteriormente, o professor alemão, Hermann J. Oberth, em 1929 publicou um capítulo falando de propulsão elétrica no seu famoso livro sobre viagens espaciais (“Wege zur Raumschiffahrt” – Métodos para viajar no espaço). Mas, a primeira sistematização dos conceitos físicos relacionados com propulsores elétricos pode ser atribuída à Ernst Stuhlinger, nos anos de 1950, através da publicação do livro “*Ion Propulsion for Space Flight*” /2, 3, 9/.

Com a grande corrida espacial dos anos de 1960, em busca de novos descobrimentos, a pesquisa em relação aos propulsores elétricos sofre um grande avanço tecnológico. Mas, é nos anos de 1980, 1990 e 2000 que os propulsores eletromagnéticos (MPDT), por serem os mais complexos, são estudados com maior profundidade e também passam a ser comercialmente utilizados /3, 9/.

2.2 – Propulsores eletromagnéticos

Os dispositivos que aceleram um gás ionizado injetado em uma câmara através da ação combinada entre os campos elétrico e magnético são classificados como aceleradores eletromagnéticos (propulsores eletromagnéticos).

O conceito da aceleração eletromagnética em uma simples forma pode ser ilustrado considerando um fluxo de gás ionizado, o qual está sujeito à ação de um campo magnético induzido \vec{B} e um campo elétrico \vec{E} , perpendiculares entre si, e também perpendiculares à velocidade do fluxo de gás \vec{u} dentro da câmara do acelerador. A **Figura 2** representa um esquema elementar de um acelerador eletromagnético com as variáveis descritas acima /2/.

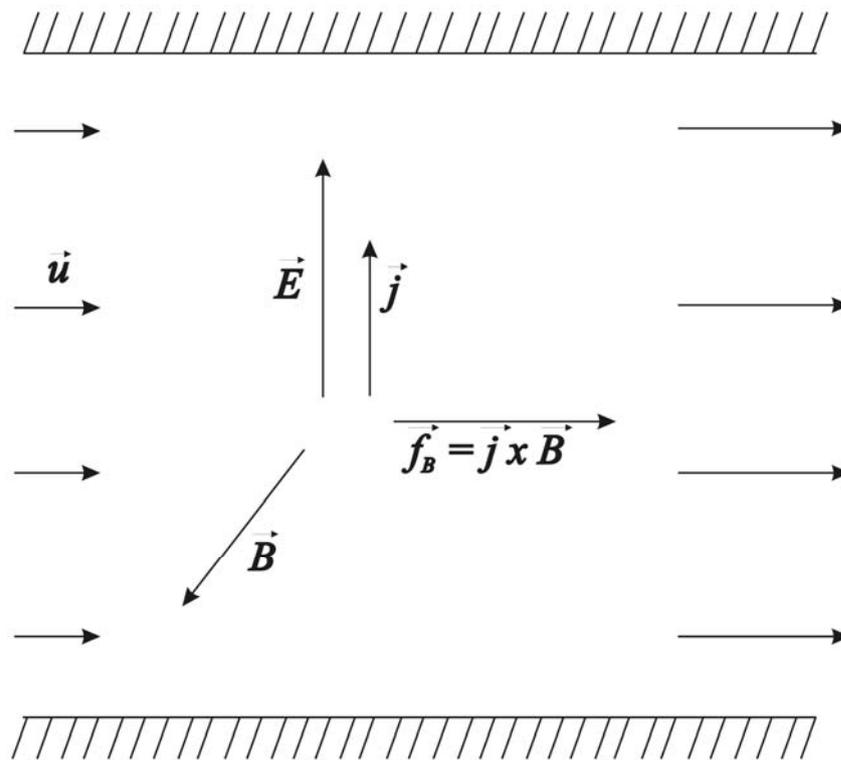


Figura 2. Acelerador eletromagnético elementar /2/.

Se o gás tem uma condutividade σ , a densidade de corrente elétrica $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B})$ atravessará o gás, paralelo ao campo elétrico \vec{E} , e a interação dessa densidade de corrente com o campo magnético induzido \vec{B} produzirá uma densidade de força $\vec{f}_B = \vec{j} \times \vec{B}$ distribuída no sentido da velocidade do fluxo de gás \vec{u} , a qual acelera o gás /2/.

Em relação às partículas, o processo pode ser descrito em termos das trajetórias médias dos elétrons, os quais tentam seguir o campo elétrico aplicado entre os eletrodos, mas acabam sofrendo rotações na direção da velocidade do gás devido ao campo magnético. O momento adquirido pelos elétrons no sentido da velocidade do fluxo do gás é transmitido para a maior parte do gás através de colisões com partículas pesadas ou por campo de polarização microscópica. A **Figura 3** representa a transferência da força para o fluxo de gás por colisões de elétrons /2/.

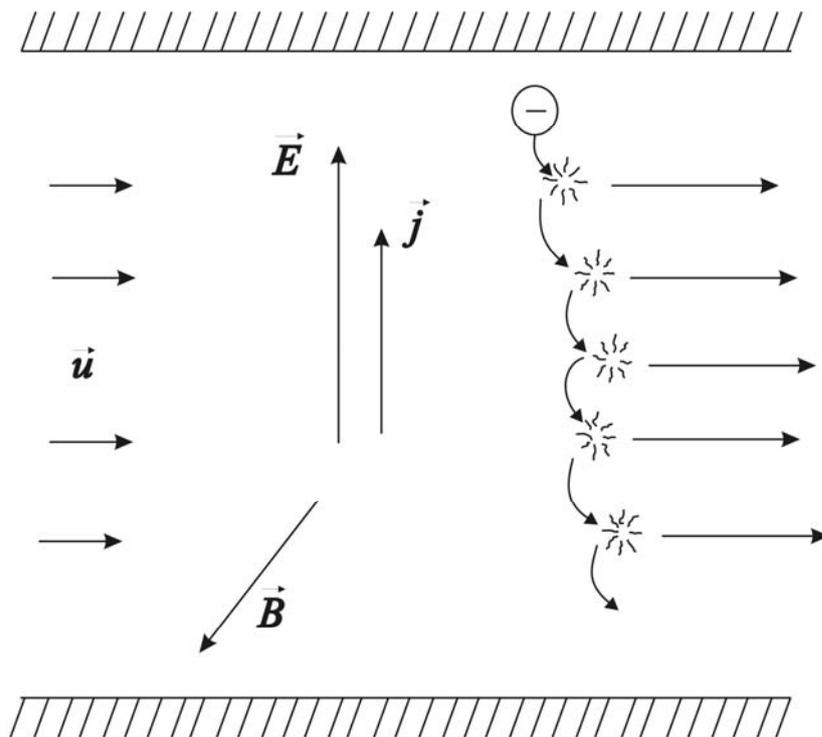


Figura 3. Transferência da força magnética para o fluxo de gás através das colisões dos elétrons /2/.

Embora exista um campo elétrico que transmite energia para o fluxo de gás, nenhuma carga livre no espaço esteve envolvida no estabelecimento da força. Por isso, não há uma limitação fundamental (carga – espaço) na densidade do fluxo de gás como às que aparecem nos aceleradores eletrostáticos puros. Isso tudo devido ao uso de gás ionizado neutro como gerador de trabalho, sendo então esses dispositivos classificados como propulsores de plasma /2/.

2.2.1 – Modelo multidimensional dependente do tempo

Geralmente a aproximação para descrever a aceleração eletromagnética nestes dispositivos é através da magnetohidrodinâmica, onde se considera um gás ionizado no interior da câmara como um fluido contínuo, cujas observáveis macroscópicas podem ser adequadamente descritas por equações com parâmetros de volume e cujos comportamentos dinâmicos podem ser representados por contínuas conservações. Essas equações são acopladas com as equações de Maxwell e adequadas relações de condutividade, incluindo a lei de Ohm. Essas relações são expressas da seguinte forma /2, 10–13/:

Conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Conservação de momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + (\vec{j} \times \vec{B}) + \vec{f}_v \quad (2)$$

Conservação de energia:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \right) \left(c_p T + \frac{\vec{u}^2}{2} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{j} \cdot \vec{E} + \phi_t + \phi_v - \phi_r \quad (3)$$

Onde p , ρ , c_p e T são, respectivamente, a pressão, a densidade, o calor específico e a temperatura absoluta do gás; \vec{u} é a velocidade do gás na câmara; \vec{j} , \vec{E} e \vec{B} , são respectivamente, densidade de corrente, campos de indução elétrico e magnético. Os símbolos \vec{f}_v , ϕ_v , ϕ_t e ϕ_r representam, respectivamente, a densidade de força devido à viscosidade do gás, o calor absorvido pelo processo de condução no gás, a dissipação de energia pela viscosidade do gás e a perda de energia radiante por unidade de volume, os quais podem ser desprezados dependendo do modelo a ser tratado /2, 12, 13/.

O aparecimento de $\vec{j} \times \vec{B}$ como força eletromagnética na equação de movimento é evidente. Na equação da conservação de energia elétrica total aparece $\vec{j} \cdot \vec{E}$, com a explícita ausência de \vec{B} . De fato, $\vec{j} \cdot \vec{E}$ expressa a componente dissipativa (efeito Joule) e também um componente de trabalho útil, isto é, o produto escalar da força eletromagnética com a velocidade do fluxo de gás.

As relações de conservações podem ser expressas pelas leis da termodinâmica, onde algumas variáveis macroscópicas (ϕ_v , ϕ_t e ϕ_r) podem ser descritas por equações de estado /2, 5, 14/.

Das equações de Maxwell, apenas três são suficientes para a descrição:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

De acordo com a hipótese anterior, a densidade da carga livre, a qual se origina de \vec{D} (campo elétrico deslocado), não tem uma contribuição significativa na resolução do problema, pois o termo $\vec{q}\vec{E}$ não aparece em (2). Para que \vec{q} (densidade de carga livre) contribua, basta adicionar ao cálculo final do problema proposto a equação de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \vec{q} \quad (7)$$

Finalmente, três relações eletromagnéticas fundamentais devem ser especificadas, duas das quais quase sempre são designadas com os seus valores no vácuo (8 e 9) e a lei de Ohm, a qual é mostrada como uma equação vetorial (10), onde \vec{j}_H e \vec{j}_r são possíveis contribuições da corrente Hall e decaimento dos íons.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (9)$$

$$\vec{j} = \sigma_0 (\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) + \vec{j}_H + \vec{j}_r \quad (10)$$

Dependendo das configurações e hipóteses em relação ao dispositivo, algumas variáveis supostas nas equações (1) até (10) podem ser eliminadas, facilitando assim a resolução do problema. Entretanto, são esses os conceitos fundamentais para a descrição do comportamento de um acelerador eletromagnético /2, 14/.

2.2.2 – Propulsor Magnetoplasmadinâmico – MPDT

O estudo desse dispositivo parte do pressuposto de que alta densidade de corrente em uma câmara acaba gerando um campo magnético intenso, capaz de produzir grande aceleração eletromagnética de um fluxo de gás. Com isso, cientistas de várias instituições, através das modificações nas variáveis operacionais dos convencionais “arcjets” (propulsores eletrotérmicos) constataram um aumento na escala de exaustão do gás, ou seja, com aumento da corrente elétrica e diminuição do fluxo de gás na câmara o dispositivo passa a ter maior rendimento, mas os problemas de desgastes dos eletrodos aumentavam. Para diminuir o desgaste dos eletrodos foi adicionada ao dispositivo uma bobina externa a câmara, a qual gera um campo magnético externo que acelera as partículas e estabiliza o plasma exaustado. Essas modificações significativas nos propulsores eletrotérmicos levam à uma nova formulação de modelos físicos para o funcionamento desses dispositivos, gerando então uma nova classe de propulsores, onde diferentes tipos de gases, geometrias dos eletrodos, taxas do fluxo de gás, níveis de diferença de potencial (d.d.p.) e corrente elétrica, e intensidades de campos magnéticos externos foram experimentados e catalogados /2/.

2.2.2.1 – Propulsão eletromagnética nos MPDTs

Um modelo analítico baseado na descrição contínua da propulsão eletromagnética foi desenvolvido por Maecker /13/ e mais tarde esclarecido por Janh /2/, tendo como resultado a seguinte expressão:

$$F_z = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_a}{r_c} + A\right),$$

onde r_a e r_c são, respectivamente, o raio do anodo e do catodo; e A é uma constante adimensional que depende da distribuição de corrente elétrica na extremidade do catodo, a qual varia entre 0 e 1 /12, 15/.

A **Figura 4** representa um esquema proposto para descrever a interação da magnetohidrodinâmica através de vários componentes. Primeiramente, uma aceleração axial orientada (como um “sopro”) é formada pela interação do arco de corrente radial com seu próprio campo magnético azimuthal (“blowing”). Em segundo, há um processo eletromagnético de “bombeamento” (“pumping”) onde os componentes axiais do arco de corrente interagem com o campo induzido azimuthal \vec{B}_θ para estabelecer um gradiente radial na pressão hidrodinâmica, a qual fornece uma força de reação na superfície do catodo. Em terceiro, se um campo magnético externo for aplicado, tendo componentes nas direções axiais e radiais, um processo eletromagnético rotacional (“swirling”) poderá ser gerado por $\vec{j}_r \vec{B}_z$ ou por $\vec{j}_z \vec{B}_r$. Finalmente, se os efeitos do tensor condutividade forem admitidos, várias interações Hall podem ocorrer, tal como a interação da componente de corrente Hall azimuthal com a componente radial do campo externo /2/.

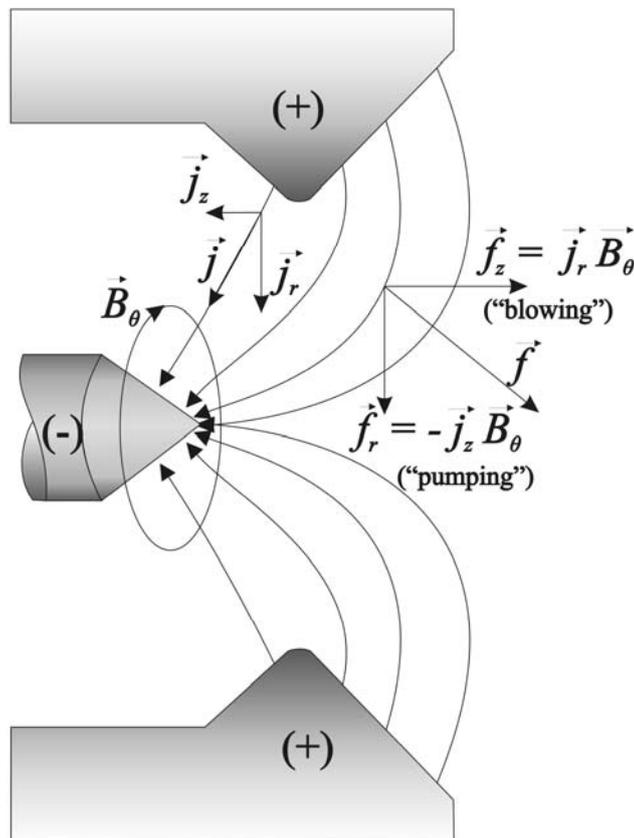


Figura 4. Modelo de um acelerador MPDT /2/.

Para seguinte descrição será ignorada a presença do campo magnético externo e, somente, considerado os mecanismos de expulsão – “blowing” e extração – “pumping”. Então, para simples ilustração dois modelos idealizados mostrarão as interações separadamente. Em seguida, um modelo mais realístico que permite a ação simultânea de ambos será examinado.

O mecanismo de expulsão pode ser tratado como um modelo que permite somente um fluxo de corrente uniforme radial, azimuthal e axial entre os eletrodos coaxiais cilíndricos (Figura 5) /2, 15/.

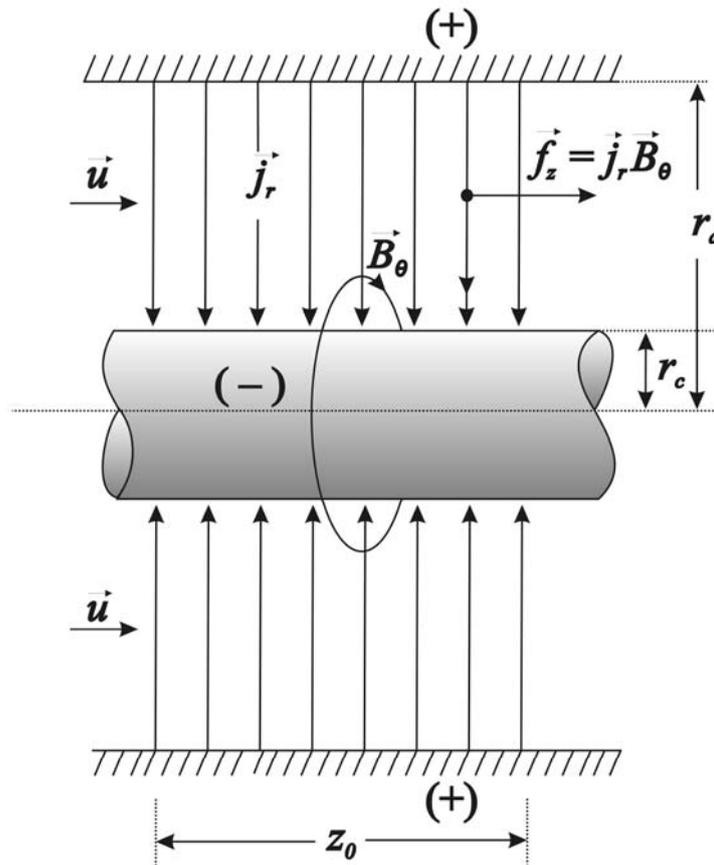


Figura 5. Modelo idealizado para análise do MPDT – corrente radial uniforme /2/.

Para a relação de Maxwell $\nabla \times \vec{B}$, o campo induzido é analisado sendo puramente azimuthal, linear em z , e inversamente proporcional à r sobre o espaço entre os eletrodos:

$$B_{\theta}(r, z) = \frac{\mu J}{2\pi r} \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) \quad (11)$$

onde $J = 2\pi r z_0 \vec{j}_r$ é a corrente total e μ é a permeabilidade magnética do meio. Desta forma, a força é puramente axial e proporcional à $\frac{z}{r^2}$:

$$f_z(r, z) = \vec{j}_r \vec{B}_\theta = \frac{\mu J^2}{4\pi^2 r^2 z_0^2} (z_0 - z) \quad (12)$$

A força axial total aplicada no gás injetado é dada pela integral de volume de f_z , no espaço entre os eletrodos:

$$F_z = \frac{\mu J^2}{4\pi^2 z_0^2} \int_0^{z_0} \int_0^{2\pi} \int_{r_c}^{r_a} \frac{z_0 - z}{r^2} r dr d\theta dz = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln \frac{r_a}{r_c} \quad (13)$$

O resultado expressado pela equação (13) mostra que a propulsão axial é gerada por uma descarga radial uniforme azimutal entre dois cilindros concêntricos, sem restrição à distribuição da densidade de corrente axial. Entretanto, é necessário fazer uma correção se a corrente radial entrar pelas extremidades ao em vez de entrar pela superfície lateral do catodo [2].

As relações (11) e (12) também são válidas para a próxima idealização, a qual considera a extremidade cônica do catodo e é esboçado pela **Figura 6**. Com isso, o baixo limite da integral interna para (13) deve ser estendida para o valor $r_c(1 - z/z_0)$, gerando o aparecimento de um segundo termo no resultado, representando a contribuição de expulsão interna à r_c :

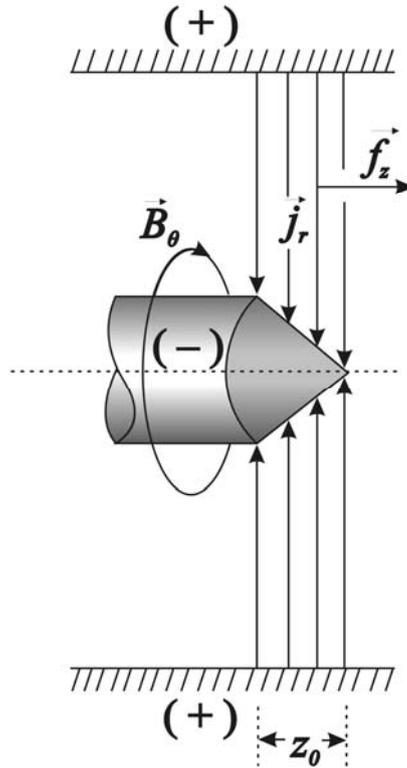


Figura 6. Modelo idealizado para análise do MPDT – corrente radial em um catodo com extremidade cônica /2/.

$$F_z = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_a}{r_c} + \frac{1}{2}\right) \quad (14)$$

O valor do segundo termo é sensetivo para uma particular distribuição de densidade de corrente acima da superfície do catodo. Nesta situação, $j(r)$ varia com $1/r$ e se permanecer uniforme acima da superfície do catodo (com correspondente variação $1/z$ sobre a superfície do anodo), a contribuição será menor:

$$F_z = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_a}{r_c} + \frac{1}{4}\right) \quad (15)$$

A contribuição eletromagnética, como mecanismo de extração, pode ser ilustrada com outra idealização de modelo de arco, em que a corrente atravessa o catodo cilíndrico como um feixe de elétrons uniforme normal à secção transversal do mesmo (**Figura 7**). Neste caso o

campo magnético no interior do arco também é azimutal, porém diretamente proporcional ao raio do catodo (16) /2/.

$$B_{\theta}(r) = \frac{\mu J r}{2\pi r_c^2} \quad (16)$$

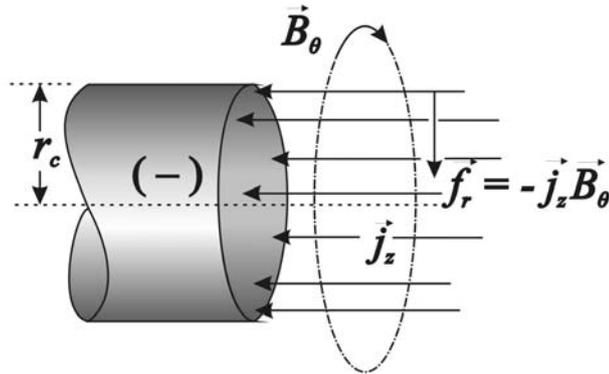


Figura 7. Modelo idealizado para análise do acelerador MPDT – corrente uniforme axial /2/.

A densidade de força radial em equilíbrio é, obrigatoriamente, balanceada por um gradiente radial de pressão do gás:

$$f_r = j_z B_{\theta} = \frac{\mu J^2}{2\pi^2 r_c^4} = -\frac{dp}{dr} \quad (17)$$

O perfil da pressão do gás sobre a face do catodo é parabólico e pode ser descrito como:

$$p(r) = p_0 + \frac{\mu J^2}{4\pi^2 r_c^2} \left[1 - \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Onde p_0 é a pressão externa à r_c . Visto que, o intervalo de pressão no catodo não é balanceado com a descarga final do anodo, então a integral de $p - p_0$ sobre a superfície do catodo concede um adicional aumento da propulsão para o arco na câmara:

$$F_c = 2\pi \int_0^{r_c} (p - p_0) r dr = \frac{\mu J^2}{8\pi} \quad (19)$$

O resultado é, novamente, diretamente proporcional à corrente elétrica total ao quadrado e independente do raio do catodo. De fato, também pode ser mostrado que independe da distribuição radial da densidade de corrente sobre a superfície do catodo.

Para construir um resultado de modelo idealizado híbrido, ou seja, envolvendo todos os elementos de interação, os quais foram anteriormente discutidos separadamente (**Figura 8**), deve-se encontrar a aceleração eletromagnética total para ser adequada à soma das contribuições de um componente exaustado para fora da câmara (“blowing”) e um componente de extração radial na direção do catodo (“pumping”). Então, para uma densidade de corrente uniforme sobre a superfície final do catodo tem-se /2, 4, 15/:

$$F = \frac{\mu J^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_a}{r_c} + \frac{3}{4}\right) \quad (20)$$

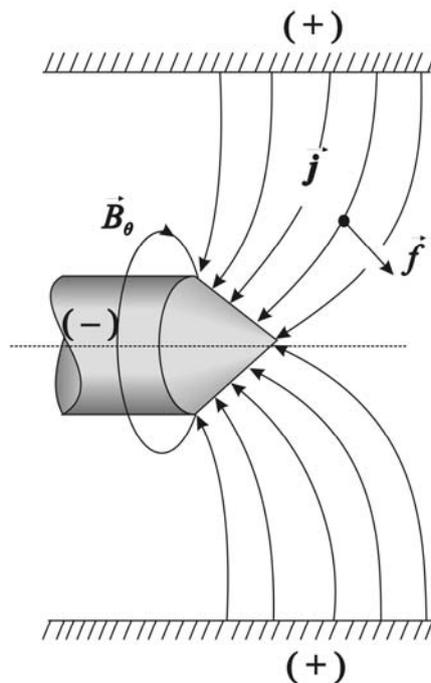


Figura 8. Modelo idealizado para análise do MPDT – modelo híbrido /2/.

Este resultado é independente da trajetória específica do arco de corrente entre o anodo e o catodo, e é apropriado para a propagação do arco de corrente padrão observado em arcos de magnetoplasmadinâmicos (MPDT – **Figura 4**).

Esse modelo pode ser formulado mais elegantemente em termos do tensor de tensão magnética que substitui a detalhada integração do volume padrão de $\vec{j} \times \vec{B}$ por uma simples integral de superfície. E também, o modelo acima não aborda a contribuição eletrotérmica, o fluxo de gás na câmara e o tipo de gás.

O modelo descrito por Tichonov /16/ aprimora a formula de Maecker através da seguinte expressão:

$$F = \frac{\mu}{4\pi} \left(\frac{\gamma + 1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{8\pi a_0 \dot{m}}{\gamma \mu J^2} \right)^2 \right) J^2,$$

onde a_0 é a velocidade acústica do íon. Esse modelo é formulado analiticamente através da magnetohidrodinâmica em uma dimensão, considerando limite livre para a vazão do gás na câmara do dispositivo. Também, o modelo descrito por Choueiri /17/ aprimora a formula de Maecker, o qual considera as variações na corrente elétrica e no tipo de gás. Esse modelo é de caráter semi-empírico, pois, deve-se considerar alguns dados experimentais para a distribuição de corrente entre os eletrodos e a distribuição de pressão na câmara interna do MPDT.

Em nenhum dos modelos descritos anteriormente foi abordada a contribuição eletrotérmica, característica dos propulsores eletrotérmicos (“arcjets”), a qual é menor que 10% para os dispositivos eletromagnéticos e depende do tipo de gás, do fluxo de gás e da corrente elétrica, sendo que para o argônio pode ser descrita pela seguinte equação /15/:

$$F_T = 0,098(\dot{m})^{0,3} I^{1,5},$$

onde \dot{m} é a taxa do fluxo de massa de gás injetada na câmara do dispositivo (em g/s) e I é a intensidade de corrente elétrica (em kA).

O efeito de um campo magnético externo, no movimento dos elétrons e conseqüentemente no movimento do plasma, não foi considerado nos modelos descritos anteriormente. Esse efeito é representado pela **Figura 9**, onde é mostrada a existência de um

campo magnético axial \vec{B}' , o qual é mais intenso que o campo induzido pelo próprio dispositivo. Nesse caso, os elétrons emitidos pela extremidade do catodo encontram-se em uma região de enormes correntes Hall e movimentam-se ($\vec{E} \times \vec{B}'$) na direção azimutal em forma de círculos espirais. Os íons também sofrem o mesmo movimento. Através desse movimento rotacional das partículas o feixe de plasma sofre uma colimação ao ser expandido para fora da câmara /2, 12/.

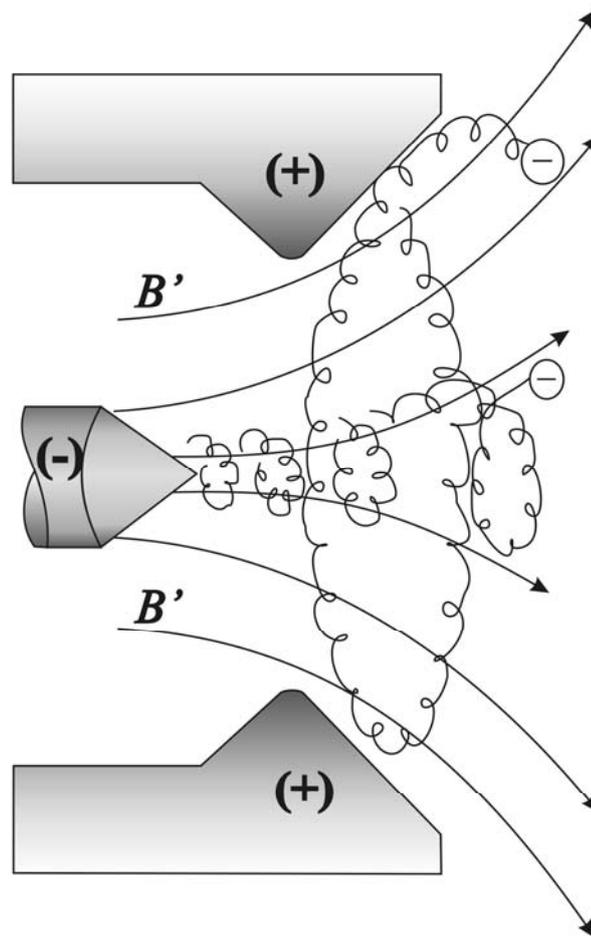


Figura 9. Movimento dos elétrons em um MPDT com campo magnético externo aplicado /2/.

Outro fator de extrema importância na eficiência dos MPDTs é a geometria dos mesmos, isto é, as dimensões do catodo e do anodo influenciam consideravelmente na propulsão do plasma exaustado para fora da câmara desses dispositivos. Algumas configurações geométricas de MPDTs com suas respectivas instituições de desenvolvimento são apresentadas na **Figura 10** /4/.

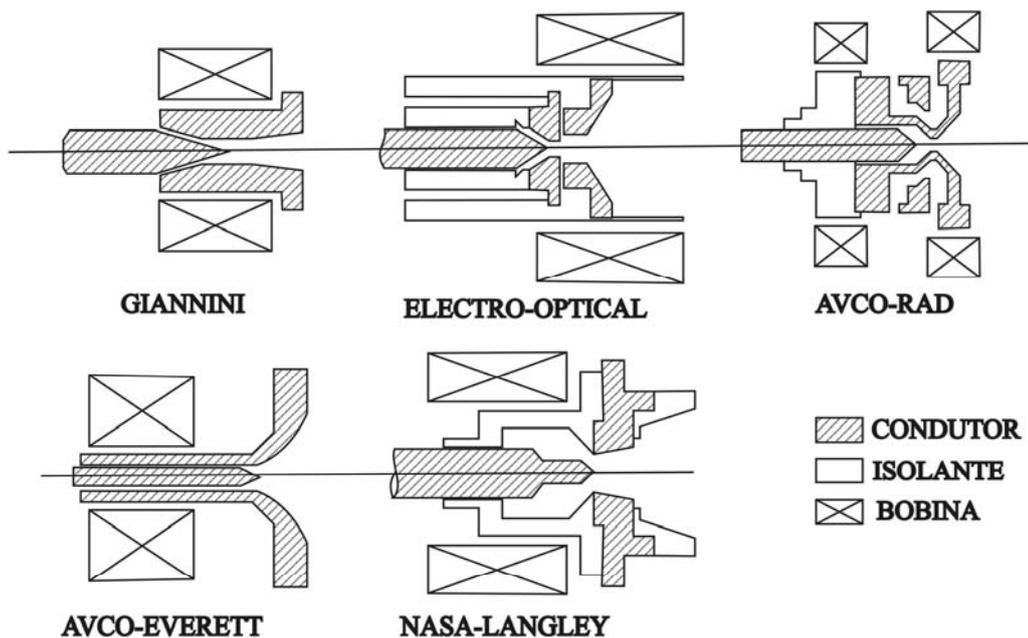


Figura 10. Configurações de alguns MPDTs /4/.

A influência dos raios dos eletrodos, anodo e catodo, na propulsão do feixe de plasma aparecem explicitamente nos modelos teóricos descritos anteriormente. A propulsão e a diferença de potencial aumentam linearmente com o campo magnético externo aplicado e quadraticamente com o raio do anodo e diminui com o aumento do raio do catodo. O comprimento dos eletrodos não influencia significativamente na propulsão /18/.

Contudo, a otimização em relação ao funcionamento dos MPDTs depende do estudo das variáveis físicas e operacionais dos mesmos.

2.3 – Processos de Soldagem e Corte dos materiais

O processo de soldagem TIG (“Tungsten Inert Gas”) é caracterizado por utilizar um arco elétrico, o qual é formado entre um eletrodo não consumível e a peça, onde a poça de fusão e o eletrodo são protegidos da ação da atmosfera por um gás geralmente inerte (argônio). Esse arco elétrico atua somente como fonte de calor para fundir os metais podendo ser adicionado um metal de adição manualmente (arame) ou automaticamente (arame fino). Em corrente contínua a extremidade do eletrodo deve ser cônica, a qual influencia a poça de fusão, ou seja, quanto mais agudo for a extremidade maior a penetração e menor a largura. A curva característica da fonte é do tipo corrente constante (“tombante”) para processos manuais, onde opera com corrente contínua CC e corrente alternada CA. Sendo assim, a

distribuição de calor e a penetração também dependem da polaridade. Por exemplo, através desse processo uma chapa de aço inoxidável, com espessura de 1,2 mm, pode ser soldada com os seguintes parâmetros: intensidade de corrente de 40 A à 60 A; a polaridade CCEN (corrente contínua com eletrodo negativo) ou CA (corrente alternada); e vazão do gás de 5 l/min /8, 19/.

O processo de soldagem PAW (“Plasma Arc Welding”) é similar ao processo TIG e aos propulsores eletrotérmicos – “Arcjets”. O sistema desse processo é constituído por um eletrodo refratário não consumível e é geralmente conectado ao pólo negativo de uma fonte de característica corrente constante (“tombante”). Circundando o eletrodo encontram-se dois bocais concêntricos, onde flui um gás geralmente inerte (argônio). O arco elétrico é iniciado por uma fonte de alta frequência entre o eletrodo e a peça (plasma transferido) ou entre o eletrodo e o bocal (plasma não transferido). O gás é eletricamente aquecido e ionizado ao passar pela descarga elétrica no orifício e emerge como um jato de plasma, efeito característico dos propulsores eletrotérmicos. As temperaturas muito altas são governadas pelo aumento das descargas de correntes devido a constrição do arco e o gás do bocal externo, pela intensidade do campo magnético e pelas forças de Lorentz. Essas temperaturas são da ordem de 25.000 K /8/.

Para os dois processos de soldagem descritos acima pode ser utilizado o procedimento de “furo controlado” (ou “keyhole”), no qual há possibilidade de soldar peças relativamente espessa, em um único passe com chanfro reto. Esse procedimento é praticado automaticamente, e sua eficiência depende da vazão do gás de orifício, da intensidade de corrente e da velocidade (constante) de soldagem /8/.

O corte Plasma utiliza os mesmos princípios da soldagem PAW. O arco sofre constrição, forma o plasma (gás altamente ionizado) e funde a peça, sendo que o próprio remove o material fundido por arraste ou com um gás auxiliar. Entretanto, o corte realizado com este dispositivo se dá por fusão, sendo possível obter pequenas extensões da ZAC (Zona Afetada pelo Calor); baixa deformação e alta qualidade /8/.

3 – MATERIAIS E METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram construídos, no LS&TC, dois dispositivos eletromagnéticos, MPDT-1 e MPDT-2. Para ambos os dispositivos foram realizados testes de funcionamento e testes de soldagem e corte. As dimensões dos dispositivos foram escolhidas através de teste experimentais prévios realizados com diferentes protótipos, onde todos tinham dimensões que possibilitavam a conexão ao corpo de uma tocha TIG, e também através da literatura /10/ que apresenta modelos matemáticos de propulsores com dimensões semelhantes às utilizadas.

3.1 – Materiais e métodos para o MPDT-1

Um esquema do dispositivo MPDT-1 é mostrado na **Figura 11**. Esse dispositivo possui um anodo cilíndrico de cobre com diâmetro externo de 25,4 mm, diâmetro interno de 5 mm e comprimento de 30 mm, refrigerado a água, e um catodo sólido AWS E WTh – 2 centralizado, com 2,4 mm de diâmetro, 150 mm de comprimento e sem cone na extremidade. Os eletrodos foram fixados através do corpo de uma tocha TIG (**Figura 12**) que também é refrigerada a água. O corpo da tocha TIG foi conectado em uma fonte de potência, do tipo corrente constante, a qual possui regulagens de alta frequência, pré-fluxo e pós-fluxo. O gás (argônio) foi injetado na câmara através de um difusor (corpo fixador na tocha TIG), com diferentes vazões (5 l/min, 10 l/min e 14 l/min). Os testes com o dispositivo foram realizados com variações da intensidade de corrente elétrica até 250 A; baixas diferenças de potenciais entre os eletrodos (d.d.p. entre 8 V e 18 V) foram medidas. As coletas dos dados experimentais foram realizadas através de um shunt (60 mV à 400 A); um divisor de tensão; um multímetro e uma máquina fotográfica, com dois filtros número três (AWS) fixados em frente a lente. As condições descritas acima foram escolhidas através de experimentos prévios, os quais buscavam as limitações dos componentes do dispositivo (catodo, anodo, corpo da tocha TIG, entre outros).

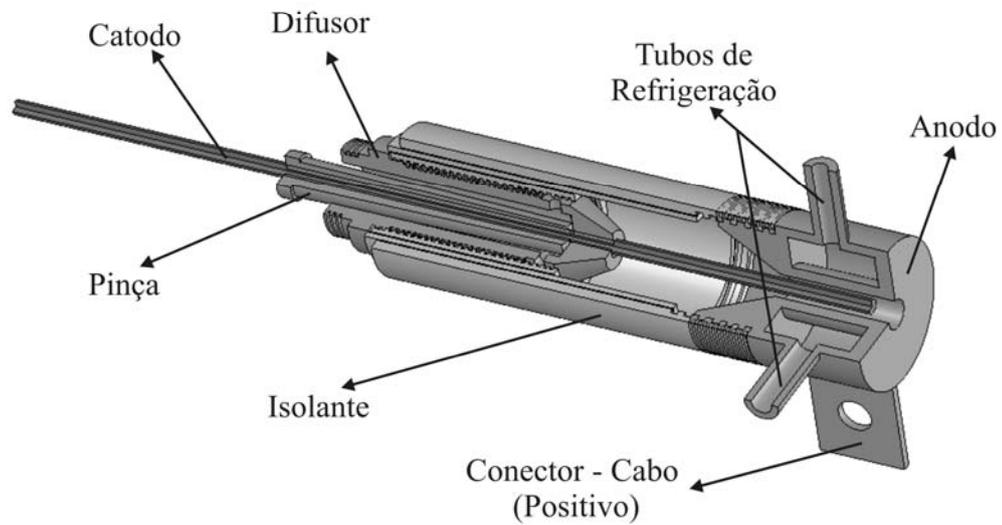


Figura 11. Desenho esquemático do dispositivo MPDT-1.

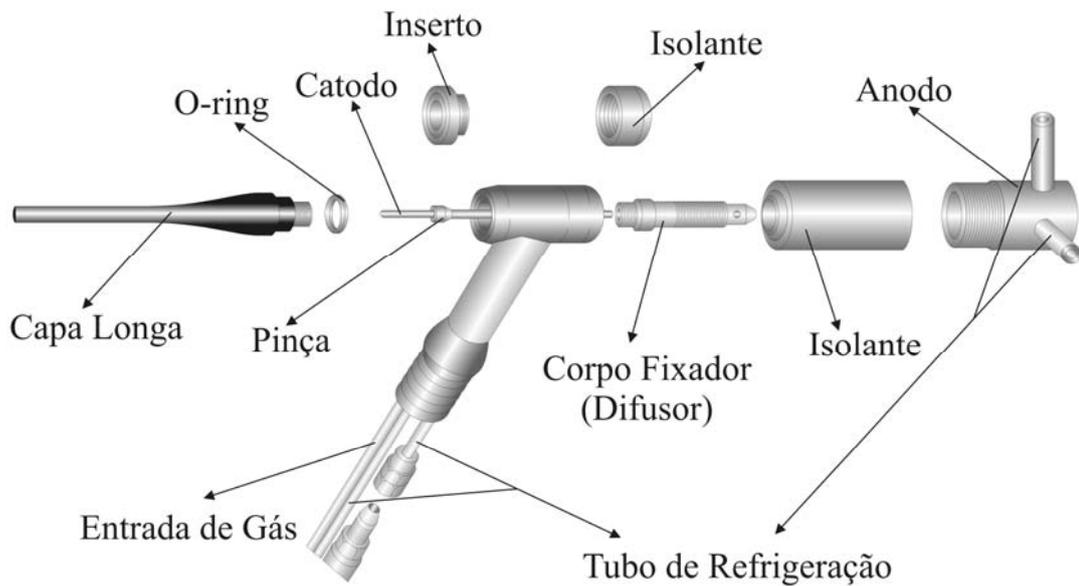


Figura 12. MPDT-1 fixado no corpo de uma tocha TIG.

Os testes de soldagem e corte foram realizados através de um dispositivo de deslocamento automático (**Figura 13**), onde o MPDT-1 e as chapas foram fixados. As chapas utilizadas foram de aço inoxidável com dimensões de 130x130x0,7 mm, 84x130x0,7 mm, e 61x166x1 mm.

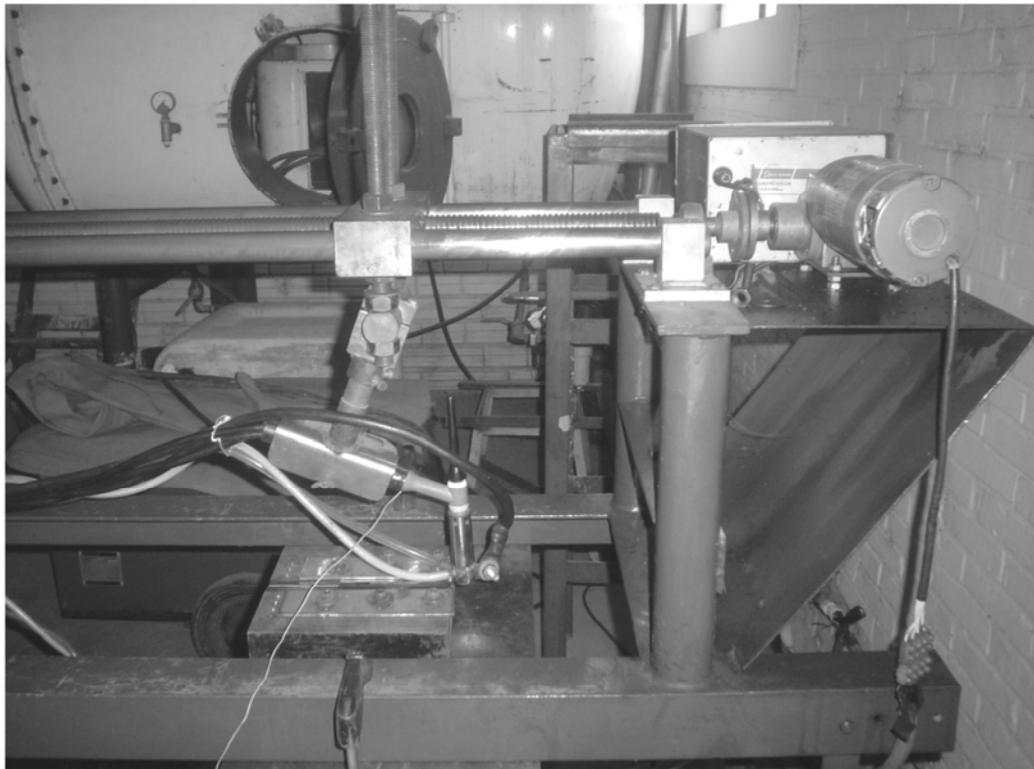


Figura 13. Dispositivo de deslocamento automático onde foi fixado o MPDT-1 e as chapas.

Os testes de funcionamento do dispositivo foram realizados através de dois experimentos. As configurações na fonte (alta-freqüência, pré-fluxo, pós-fluxo) foram iguais para os dois experimentos. A diferença entre os experimentos foi na posição do catodo (extremidade, na qual ocorre a ignição da ionização) em relação ao anodo.

No primeiro experimento a posição relativa X entre os eletrodos (catodo e anodo) são mostradas através da **Figura 14**, onde o valor de X é de 15 mm. Ao acionar o dispositivo esperava-se a estabilização do feixe de plasma, o que ocorre em segundos. Feito isso, em seguida foram realizadas medidas de diferença de potencial no shunt e no divisor de tensão; também foram registradas as imagens do feixe de plasma expulso para o exterior da câmara através de uma máquina fotográfica com dois filtros número três (AWS) adaptados. A determinação e cálculos das dimensões das imagens foram realizados através de um software e uma relação de triângulos respectivamente. Esses procedimentos de coleta dos dados experimentais foram realizados para valores diferentes de intensidade de corrente elétrica e vazões do gás.

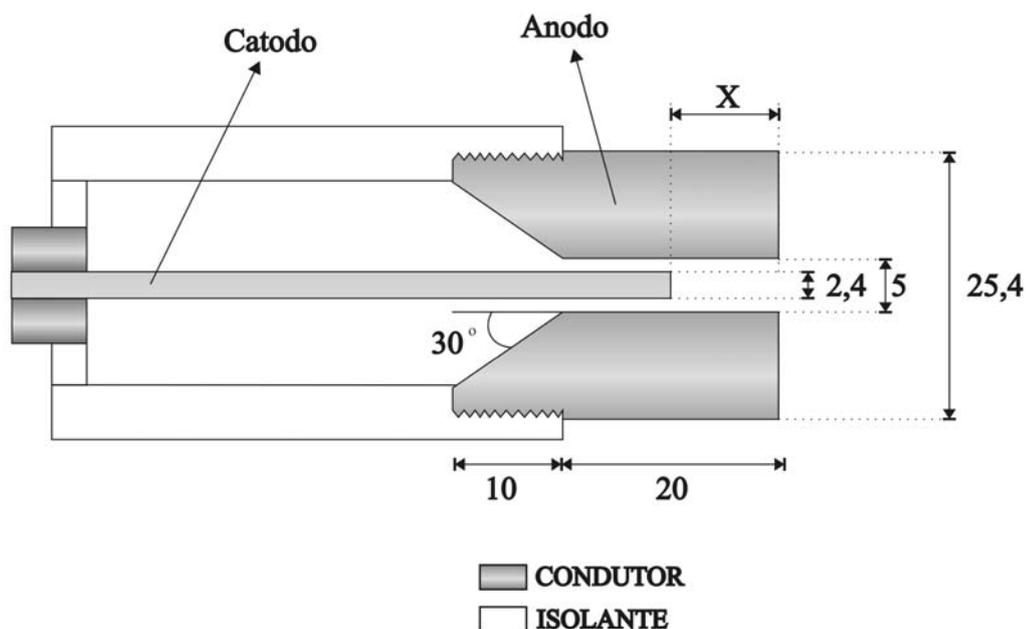


Figura 14. Esquema mostrando a posição relativa X entre os eletrodos (catodo e anodo) e algumas dimensões em mm.

Os mesmos procedimentos foram aplicados para o segundo experimento, porém a posição relativa X entre o catodo e o anodo, que também é esquematizada através da **Figura 14**, foi de 10 mm.

Também, para cada experimento foram realizadas três medidas, mantendo os parâmetros inalterados, isso, para ter uma melhor precisão nos resultados.

Vários testes foram realizados em soldagem e corte com o dispositivo, variando-se as seguintes grandezas: intensidades de corrente, vazões do gás, velocidades de soldagem e corte e distância entre o bocal e a chapa. Isso tudo, devido à procura de melhor desempenho do dispositivo. Portanto, após esses testes, para que o dispositivo propicie soldagem e corte, foram empregados os seguintes fatores: intensidade de corrente elétrica acima de 200 A, posição relativa entre os eletrodos (catodo e anodo) do segundo experimento, vazão do gás para o processo de soldagem menor ou igual a 5 litros/min e maior que 5 litros/min para os processos de corte. As velocidades de soldagem empregadas foram de 4,3; 5,7 e 7,2 mm/s.

3.2 – Materiais e métodos para o MPDT-2

Para este dispositivo foi aumentado o comprimento do anodo devido a necessidade de acoplar ao mesmo um bocal de gás de proteção, o qual tem a finalidade de diminuir a

oxidação do cordão de solda; e também acoplar uma bobina geradora de um campo magnético externo. As outras dimensões foram mantidas iguais ao MPDT-1.

Um esquema do dispositivo MPDT-2 é mostrado na **Figura 15**. Esse dispositivo possui um anodo cilíndrico de cobre com diâmetro externo de 25,4 mm, diâmetro interno de 5 mm e comprimento de 45 mm, refrigerado a água, e um catodo sólido AWS E WTh – 2 centralizado, com 2,4 mm de diâmetro, 150 mm de comprimento e a sua extremidade cônica. Também, ao anodo foi anexado um bocal de latão removível cuja função é adicionar um gás de proteção. Os eletrodos foram fixados ao corpo de uma tocha TIG. O corpo da tocha TIG foi conectado em uma fonte de potência, do tipo corrente constante (“tombante”) e polaridade CCEN (corrente contínua eletrodo negativo), a qual possui regulagem de pré-fluxo, pós-fluxo. O gás (argônio) foi injetado na câmara, através de um difusor (corpo fixador – tocha TIG), com diferentes vazões (5 litros/min, 7 litros/min, 10 litros/min e 16 litros/min). Os testes com o dispositivo foram realizados com variações na intensidade de corrente elétrica com intervalo de 150 A – 230 A; nos ângulos (α) da extremidade do catodo (30, 45 e 60 graus); e na posição X do catodo em relação ao anodo (**Figura 16**). Essas condições foram escolhidas experimentalmente buscando as limitações dos componentes do dispositivo.

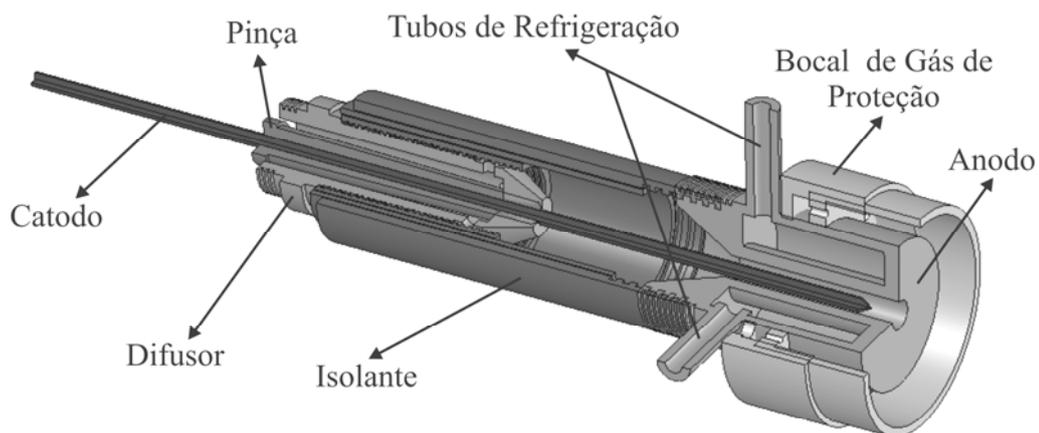


Figura 15. Desenho esquemático do dispositivo MPDT-2.

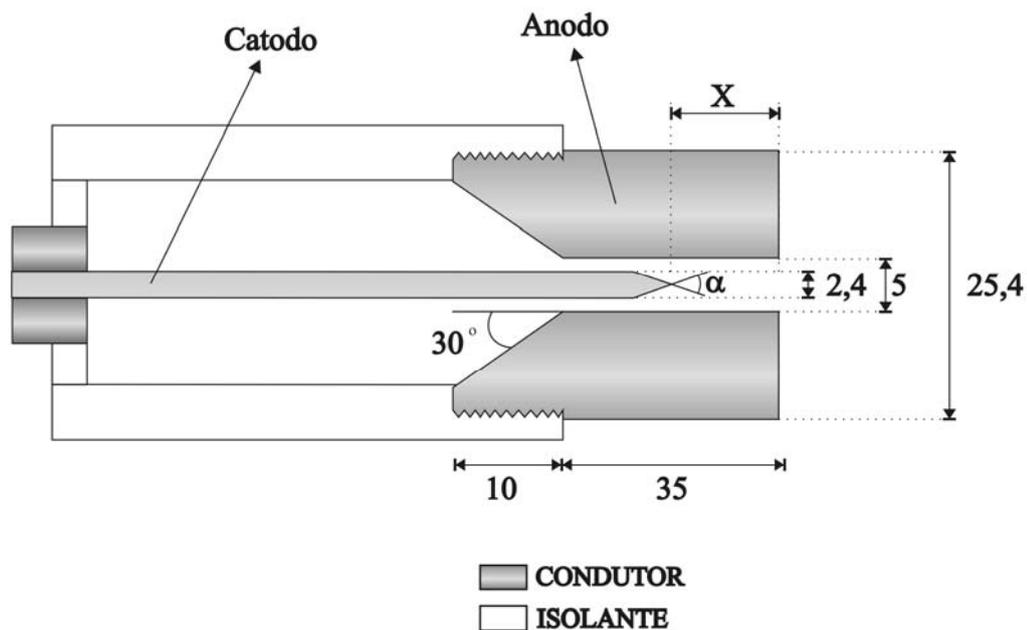


Figura 16. Esquema mostrando a posição relativa X entre os eletrodos (catodo e anodo) e algumas dimensões em mm.

A intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos foi medida através de um multímetro conectado ao shunt de 60 mV à 400 A e pela fonte de potência; a diferença de potencial entre os eletrodos também foi fornecida pela fonte de potência; a temperatura do fluxo de água (3 l/min) no sistema de refrigeração do anodo foi medida através de um termopar fixado na saída de água e a força propulsora foi medida através de uma balança eletrônica.

Os testes de funcionamento do dispositivo foram realizados através de três experimentos. O primeiro experimento foi realizado com ângulo de 60° na extremidade do catodo e variando a distância relativa entre os eletrodos ($X = 5$ mm, $X = 10$ mm e $X = 15$ mm – **Figura 16**); o fluxo de gás na câmara (5 l/min, 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min); e a intensidade de corrente elétrica (intervalo de 150 A à 230 A). O segundo e o terceiro experimento foram realizados com o catodo apontado na sua extremidade com ângulos de 45° e 30° , respectivamente, onde ambos sofreram as mesmas variações, nas grandezas físicas, que o primeiro experimento.

A **Figura 17** representa o aparato experimental utilizado para medir a força propulsora. O MPDT-2 foi anexado no corpo de uma tocha TIG, a qual foi rigidamente fixada. Para evitar o aquecimento da balança eletrônica foi inserido sobre a mesma um isolante térmico e uma chapa de aço com espessuras de 30 mm e 12 mm, respectivamente. A

distância entre o bocal e a chapa de aço foi de 40 mm. Para cada teste, inicialmente acionava-se o dispositivo, sem que o gás fosse ionizado, e media-se com a balança eletrônica a força do gás expulso para fora da câmara; posteriormente acionava-se o dispositivo ionizando o gás e media-se a força do gás ionizado (plasma) expulso para fora da câmara. Para ambas as medidas esperava-se estabilizar o valor na balança. A diferença entre as forças (gás não ionizado e plasma) multiplicada pela intensidade do campo gravitacional local fornece o valor, aproximado, da força propulsora desse dispositivo em Newtons. O aparato experimental localizava-se em lugar fechado, tornando o sistema isolado de forças externas que poderiam afetar a estabilização da balança.

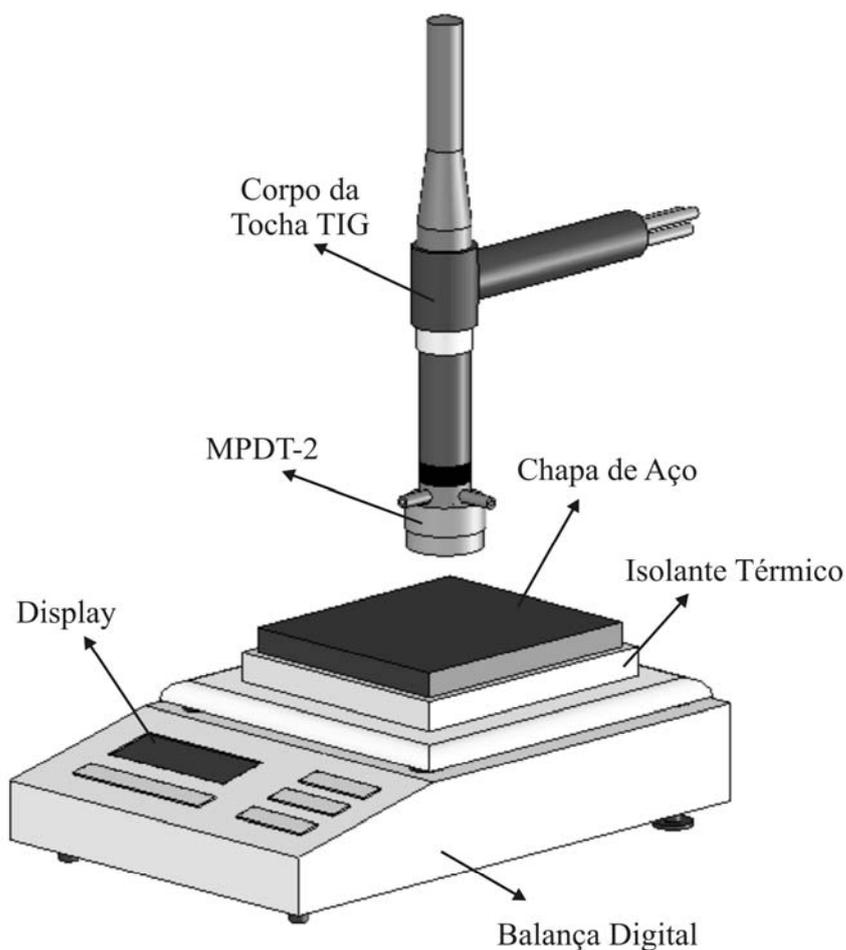


Figura 17. Desenho esquemático do aparato experimental desenvolvido para medir a força propulsora fornecida pelo MPDT-2.

Medidas de força propulsora também foram realizadas com a adição de um campo magnético externo, o qual tem função de estabilizar e acelerar o plasma. A **Figura 18**

representa o MPDT-2, no qual o bocal de gás de proteção foi substituído por uma bobina cilíndrica. A **Figura 19** apresenta um esquema da bobina com suas dimensões, a qual é formada por dois isolantes cilíndricos de acrílico e enrolamento com fio de cobre esmaltado (diâmetro do fio de 0,8 mm) de, aproximadamente, 330 voltas. O campo magnético foi calculado através da seguinte equação:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2 \pi r},$$

onde, B é a intensidade do campo magnético, μ_0 é a permeabilidade magnética do meio ($\mu_0(\text{vácuo}) \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1}$), n é número de voltas, I é a intensidade de corrente (A) e r é a distância do centro da bobina até o centro do fio condutor (m).

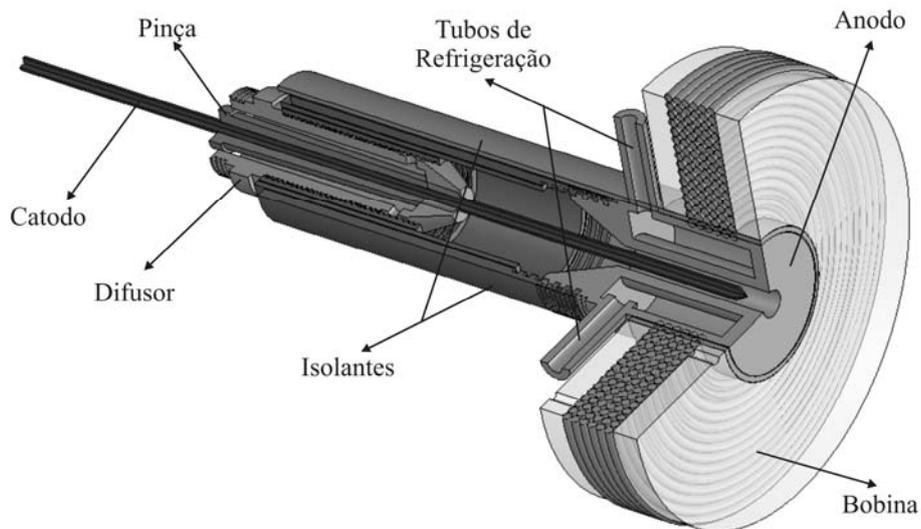


Figura 18. Desenho esquemático do MPDT-2 conectado a uma bobina.

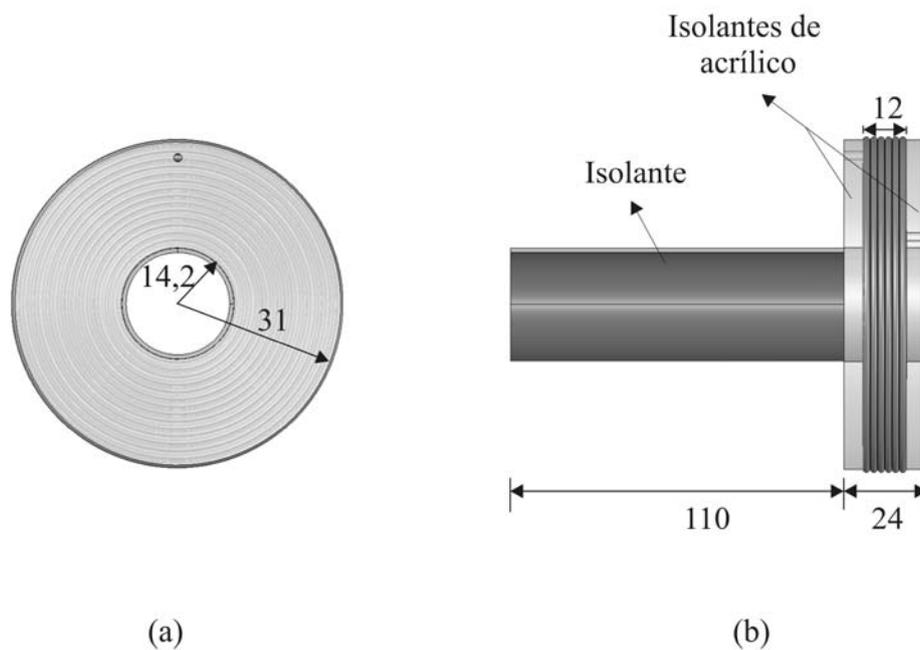


Figura 19. (a) Parte frontal da bobina com as dimensões do raio interno e externo e (b) parte lateral com as dimensões dos comprimentos (distâncias em mm).

Os testes foram realizados com fluxo de gás de 16 l/min; intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos de 150 A, 170 A e 190 A e intensidade de campo magnético no centro da bobina de 0,007 Tesla, 0,015 Tesla e 0,022 Tesla. O procedimento de coleta de dados, em princípio, foi semelhante ao descrito anteriormente, porém neste caso a medida da força do gás não ionizado e a medida da força do plasma, ambos expulsos para fora da câmara, foram realizadas quando a bobina estava ligada.

A **Figura 20** apresenta o desenho esquemático do dispositivo de deslocamento, onde o MPDT-2 e as chapas de aço foram anexados para a realização dos processos de soldagem e corte.

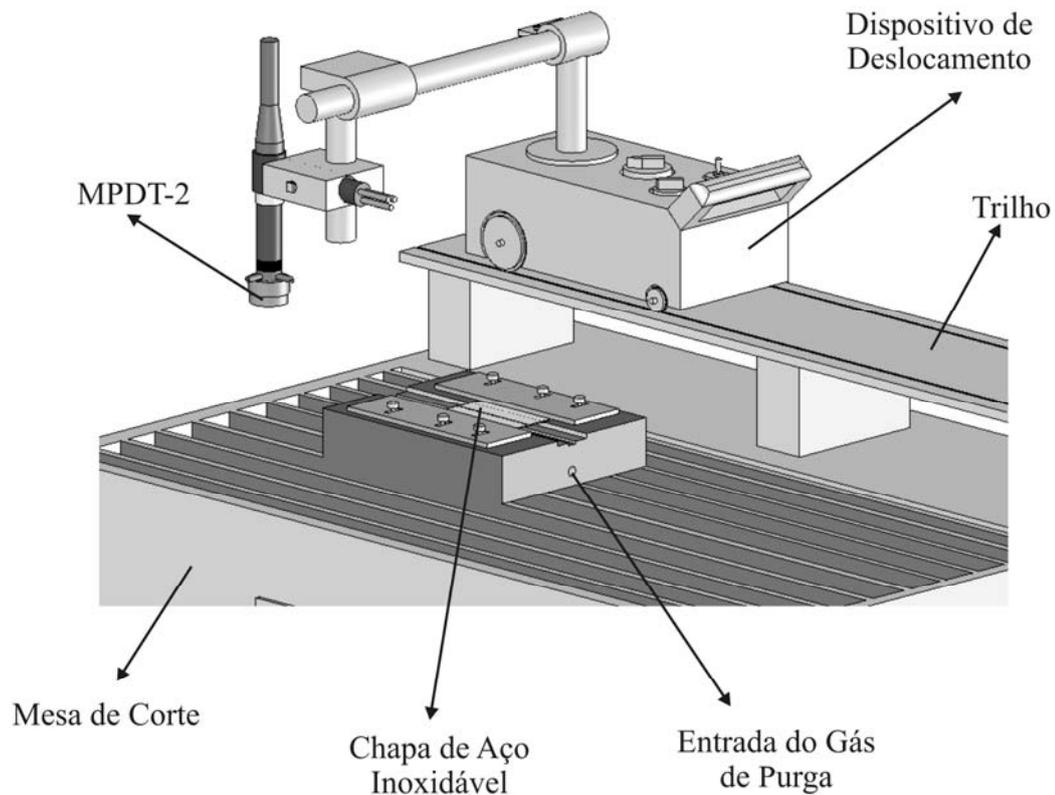


Figura 20. Esquema representando o aparato experimental utilizado na realização dos processos de soldagem e corte dos materiais com o MPDT-2.

Antes de realizar a união das chapas foram feitos testes de refusão variando os parâmetros para analisar a penetração e a largura do cordão de solda. A soldagem das chapas de aço foi realizada através da soldagem autógena (sem metal de adição). As chapas eram fixadas e centralizadas de acordo com o jato de plasma exaustado para fora da câmara. Gás argônio foi utilizado na câmara interna do MPDT-2 (fluxo de gás ionizado), no bocal externo (fluxo de gás de proteção) e no dispositivo fixador das chapas (gás de purga), onde as vazões foram, respectivamente, de 5 l/min, 10 l/min e 5 l/min. A distância entre o bocal e a peça foi de 5 mm e a distância X (**Figura 16**) entre o catodo e o anodo de 5 mm. Um esquema representando os fluxos dos gases e a centralização das chapas é mostrado através da **Figura 21**. As chapas de aço inoxidável utilizadas nos processos de soldagem tinham dimensões de 100x50x1,2 mm.

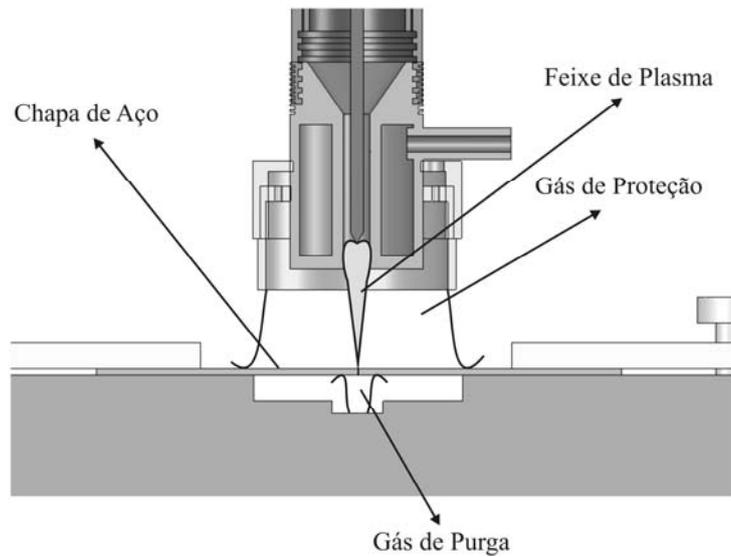


Figura 21. Representação dos fluxos dos gases e centralização da chapa de aço.

Os testes de corte com o MPDT-2 foram realizados com chapas de diferentes espessuras (0,8 mm à 4 mm) e materiais (alumínio e vários tipos de aços). Vazões acima de 10 l/min de gás argônio, na câmara do MPDT-2, foram utilizadas. A distância entre o bocal e a peça foi de 5 mm e também diferentes velocidades de corte e intensidades de corrente elétrica foram aplicadas.

4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A apresentação e discussão dos resultados são divididas em duas partes, ou seja, os resultados referentes ao funcionamento e aplicação em processos de soldagem e corte do dispositivo MPDT-1 e resultados em relação ao funcionamento e aplicação em processos de soldagem e corte do MPDT-2.

4.1 – Resultados obtidos com o MPDT-1

Esta etapa do trabalho conduz à dois tipos de resultados, um de acordo com o funcionamento do dispositivo (MPDT-1) e outro com a aplicação do mesmo em processos de soldagem e corte.

4.1.1 – Funcionamento do MPDT-1

Para ambos os experimentos foram medidos os comprimentos reais do plasma expulso para o exterior da câmara, a diferença de potencial (d.d.p. entre anodo e catodo) e a intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos. Os dados foram analisados através de gráficos e imagens. A **Figura 22** mostra algumas imagens do feixe em forma de cone gerado pelo dispositivo para a configuração do primeiro experimento (posição X = 15 mm – **Figura 14**), onde a imagem “14” corresponde ao feixe de plasma formado com intensidade de corrente de 226,7 A, d.d.p. de 11,5 V, vazão do gás de 5 l/min e comprimento real do feixe de, aproximadamente, 12,5 mm; a imagem “15” corresponde ao feixe de plasma formado com intensidade de corrente de 213,3 A, d.d.p. de 14,6 V, vazão do gás de 10 l/min e comprimento real do feixe de, aproximadamente, 14,4 mm; a imagem “16” corresponde ao feixe de plasma formado com intensidade de corrente de 210,0 A, d.d.p. de 14,6 V, vazão do gás de 14 l/min e comprimento real do feixe de, aproximadamente, 13,0 mm. A **Figura 23** mostra a diferença de potencial (d.d.p.) entre os eletrodos em função da intensidade de corrente elétrica para três vazões de gás (5 l/min, 10 l/min e 14 l/min), onde a d.d.p. se mantém, praticamente, constante para cada vazão de gás e, também, ocorre aumento da d.d.p. com o aumento da vazão para as mesmas correntes, isso ocorre devido a necessidade de aumentar a energia de dissociação das moléculas, isto é, se aumentar o número de moléculas de gás na câmara do dispositivo sem variara a corrente, a d.d.p. entre os eletrodos vai aumentar, conseqüentemente sua energia de dissociação também vai aumentar. Na **Figura 24** encontra-se o comprimento real do feixe

expulso para o exterior da câmara em função da intensidade de corrente elétrica. Nesse caso ocorreu um mínimo valor local para o comprimento do feixe para um intervalo de corrente de 160 A à 180 A, isso para as três vazões de gás. Esse mínimo ocorreu devido a uma possível descentralização do catodo em relação ao anodo.



Figura 22. Imagens dos feixes de plasma para o primeiro experimento.

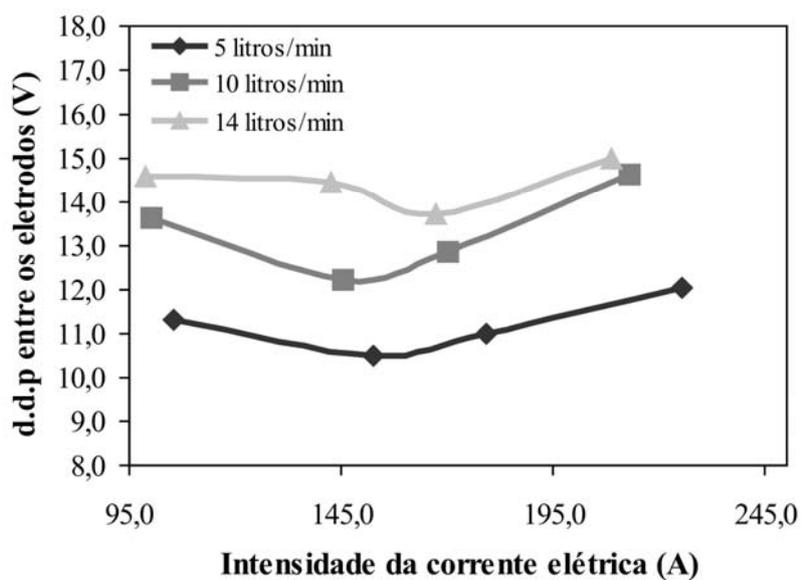


Figura 23. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 15$ mm (**Figura 14**).

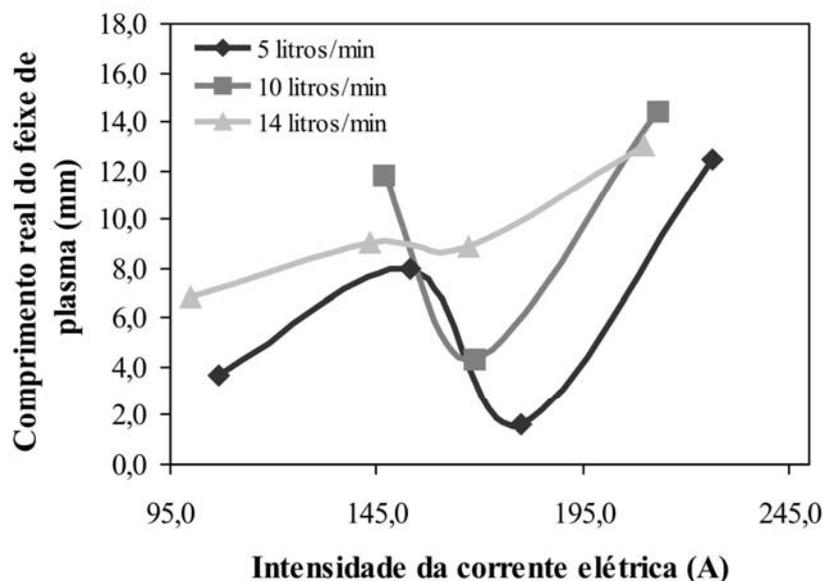


Figura 24. Comprimento do feixe de plasma expulso para o exterior da câmara em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 15$ mm (**Figura 14**).

A **Figura 25** mostra algumas imagens do feixe em forma de cone gerado pelo dispositivo para a configuração do segundo experimento (posição $X = 10$ mm – **Figura 14**), onde a imagem “10” corresponde ao feixe de plasma formado com intensidade de corrente de 206,7 A, d.d.p. de 17,7 V, vazão do gás de 14 l/min e comprimento real do feixe de, aproximadamente, 16,7 mm; a imagem “11” corresponde ao feixe de plasma formado com intensidade de corrente de 218,0 A, d.d.p. de 13,0 V, vazão do gás de 10 l/min e comprimento real do feixe de, aproximadamente, 8,9 mm; a imagem “12” corresponde ao feixe de plasma formado com intensidade de corrente de 221,3 A, d.d.p. de 11,7 V, vazão do gás de 5 l/min e comprimento real do feixe de, aproximadamente, 5,0 mm. Para este experimento, a **Figura 26** indica um pequeno aumento da d.d.p. para um intervalo de corrente de 90 A à 150 A; após esse valor a d.d.p. se mantém, praticamente, constante, com exceção do teste em que se usa a vazão de 14 l/min, onde a d.d.p. continuou aumentando com a intensidade de corrente. A d.d.p. em função da corrente elétrica, para as três vazões de gás, tem comportamento semelhante ao do primeiro experimento, ou seja, a d.d.p. aumenta com o aumento da vazão. A **Figura 27** ilustra o comprimento real do feixe expulso para o exterior da câmara em função da intensidade de corrente; o resultado é contrário ao primeiro experimento, pois constatou-se um máximo valor de comprimento do feixe para um intervalo de corrente elétrica de 150 A à 180 A. Após o pico de máximo observa-se uma diminuição do comprimento do feixe, isso, também é devido a descentralização do catodo, ou seja, aumentando a intensidade de corrente

elétrica aumenta o efeito joule (aquecimento) do catodo, fazendo com que o mesmo sofra flexão e conseqüentemente descentralização.



Figura 25. Imagens dos feixes de plasma para o segundo experimento.

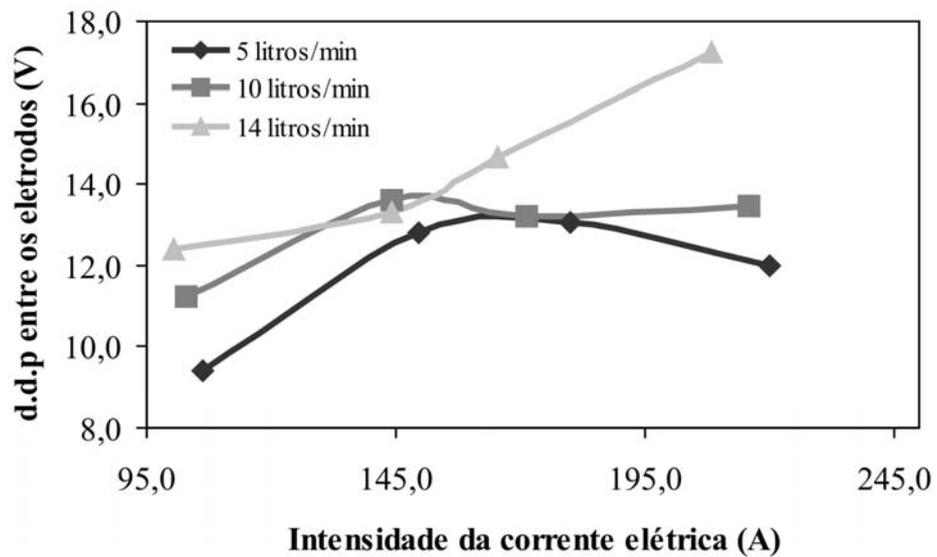


Figura 26. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 10$ mm (**Figura 14**).

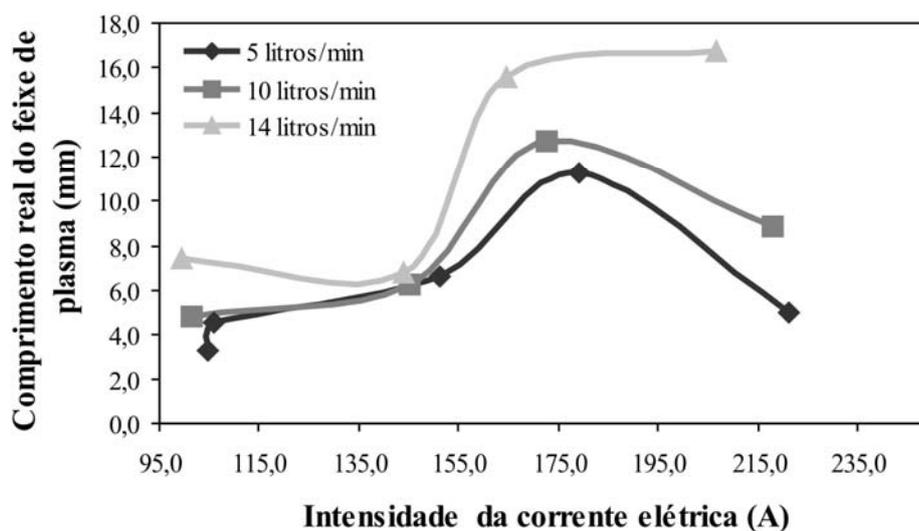


Figura 27. Comprimento do feixe de plasma expulso para o exterior da câmara em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões do gás e $X = 10$ mm (**Figura 14**).

4.1.2 – Aplicação do MPDT-1 em Processos de Soldagem e Corte

Os dados experimentais coletados e calculados, tais como: intensidade de corrente, diferença de potencial entre os eletrodos, velocidades de soldagem e corte, e outros são apresentados na **Tabela 1** (página 36).

Para os testes onde ocorreram soldagens (2, 5, 6 e 7), em todos obteve-se penetração completa, porém os cordões de solda apresentaram grande oxidação devido a falta de um gás de proteção e também apresentaram algumas irregularidades devido a excessiva vazão de gás. A **Figura 28** e a **Figura 29** mostram os resultados obtidos, respectivamente, para o teste 2 e 7.

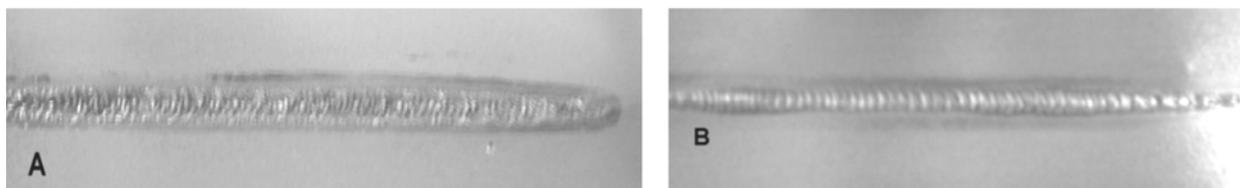


Figura 28. Vista de uma seção da chapa de aço inoxidável com 1 mm de espessura soldada através do MPDT-1, onde “A” é a superfície superior e “B” é a superfície inferior da chapa. Esta imagem refere-se ao teste 2, o qual apresenta os dados experimentais na **Tabela 1**.

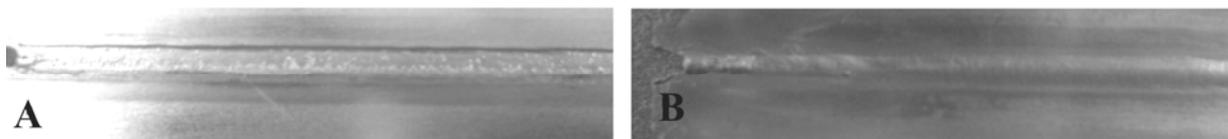


Figura 29. Vista de uma secção da chapa de aço inoxidável com 0,7 mm de espessura soldada através do MPDT-1, onde “A” é a superfície superior e “B” é a superfície inferior da chapa. Esta imagem refere-se ao teste 7, o qual apresenta os dados experimentais na **Tabela 1**.

Os testes 1, 3 e 4 apresentam a aplicação do dispositivo para corte dos materiais. Os resultados apresentam alta oxidação e, mesmo aumentando a vazão do gás, o metal fundido não foi suficientemente expelido no momento do corte, causando irregularidade nas chapas cortadas com o MPDT-1. Esses resultados são mostrados na **Figura 30**.

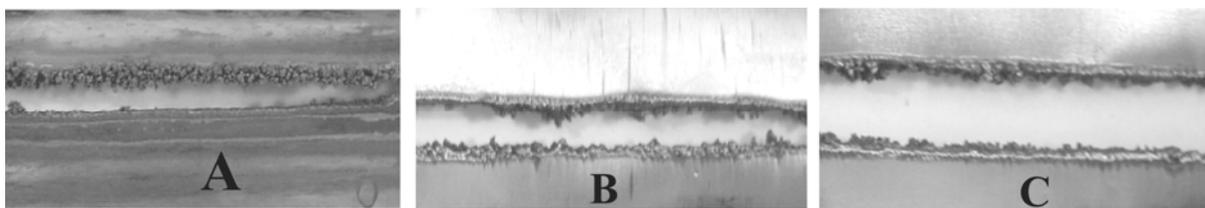


Figura 30. Resultados dos testes de corte através do MPDT-1. “A” refere-se ao teste 1, “B” ao teste 3 e “C” ao teste 4; os parâmetros de corte são apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1. Dados experimentais dos testes de soldagem e corte utilizando o dispositivo MPDT-1.

Grandezas Físicas	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
d.d.p. (V)	12,9	12,2	13,7	14,3
I (A)	223,8	213,6	214,9	215,1
Velocidade de Soldagem ou Corte (mm/s)	4,3	5,7	5,7	7,2
Distância entre bocal e chapa (mm)	6,1	7	7	8
Vazão de Gás (l/min)	5	5	10	14
Dimensões da chapa (mm)	61x166x1	61x166x1	61x166x1	61x166x1
Grandezas Físicas	Teste 5	Teste 6	Teste 7	
d.d.p. (V)	11,4	11,6	13,2	
I (A)	209,6	209,6	213,1	
Velocidade de Soldagem ou Corte (mm/s)	4,3	5,7	5,7	
Distância entre bocal e chapa (mm)	7	7	7	
Vazão de Gás (l/min)	3	3	5	
Dimensões da chapa (mm)	61x166x1	84x130x0,7	130x130x0,7	

4.2 – Resultados obtidos com o MPDT-2

Dois tipos de resultados são apresentados para o dispositivo MPDT-2; um referente ao seu funcionamento e o outro referente à aplicação do mesmo em processos de soldagem e corte de materiais.

4.2.1 – Funcionamento do MPDT-2

Os resultados obtidos para o funcionamento do MPDT-2 verificam a influência sobre a força propulsora (exaustão do feixe de plasma para fora da câmara), da intensidade de corrente elétrica; da extremidade cônica do catodo; da vazão do gás; da posição relativa X entre o catodo e anodo (**Figura 16**) e do campo magnético externo aplicado ao dispositivo. A intensidade de corrente elétrica foi relacionada com a diferença de potencial entre os eletrodos e também com a variação de temperatura no fluxo d'água do sistema de refrigeração (anodo).

Esses resultados foram analisados através de gráficos, nos quais uma linha de tendência (“best fit”) linear foi plotada.

Segundo o modelo descrito por Tichonov /16/ aumentando a vazão de gás e mantendo a intensidade de corrente constante a força propulsora também aumentará. Para o mesmo modelo, se aumentar somente a intensidade de corrente, a força propulsora também aumentará. Para as variações no ângulo da extremidade cônica do catodo esperam-se pequenas variações, pois segundo o simples modelo descrito por Maecker /13/ e Janh /2/ a constante adimensional A é acrescentada na equação (pagina 8) exclusivamente devido a distribuição de corrente na extremidade do catodo, ou seja, variações na extremidade cônica do catodo variam as distribuições de corrente elétrica e conseqüentemente o valor de A , que varia entre 0 e 1. Para as variações na posição X entre os eletrodos espera-se um aumento da força propulsora em função do aumento do valor de X , pois aumentando X o gás sofrerá maior expansão interna à câmara, acentuando o fenômeno de dissociação, e conseqüentemente elevando a aceleração do plasma.

As **Figuras 31, 32 e 33** apresentam a força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. Para estes experimentos foram utilizadas posições X relativas entre os eletrodos de 5 mm, 10 mm e 15 mm, respectivamente, e ângulo na extremidade do catodo de 60° . Os gráficos mostram que a força propulsora teve um aumento significativo com o aumento da corrente para os três experimentos realizados com vazão de 16 l/min e quase não variou para os experimentos realizados com as outras vazões. Também, a força aumenta significativamente com o aumento da vazão do gás para os mesmo valores de corrente elétrica, com exceção dos experimentos realizados com vazões do gás de 5 l/min e 7l/min e posição entre os eletrodos $X = 5$ mm.

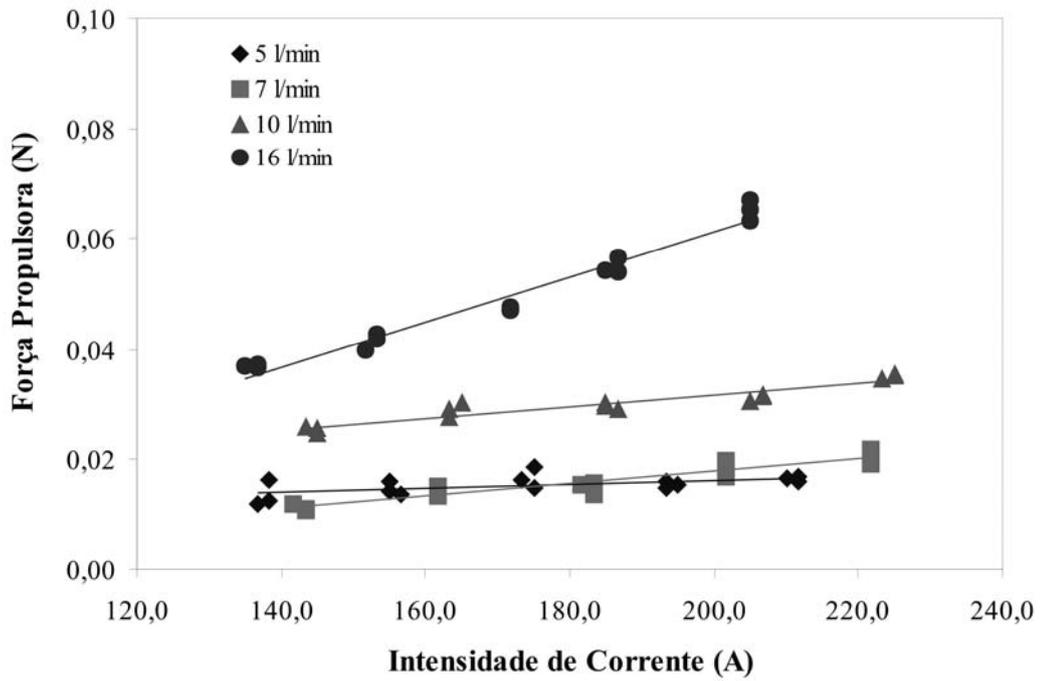


Figura 31. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, X = 5 mm e cone na extremidade do catodo de 60°.

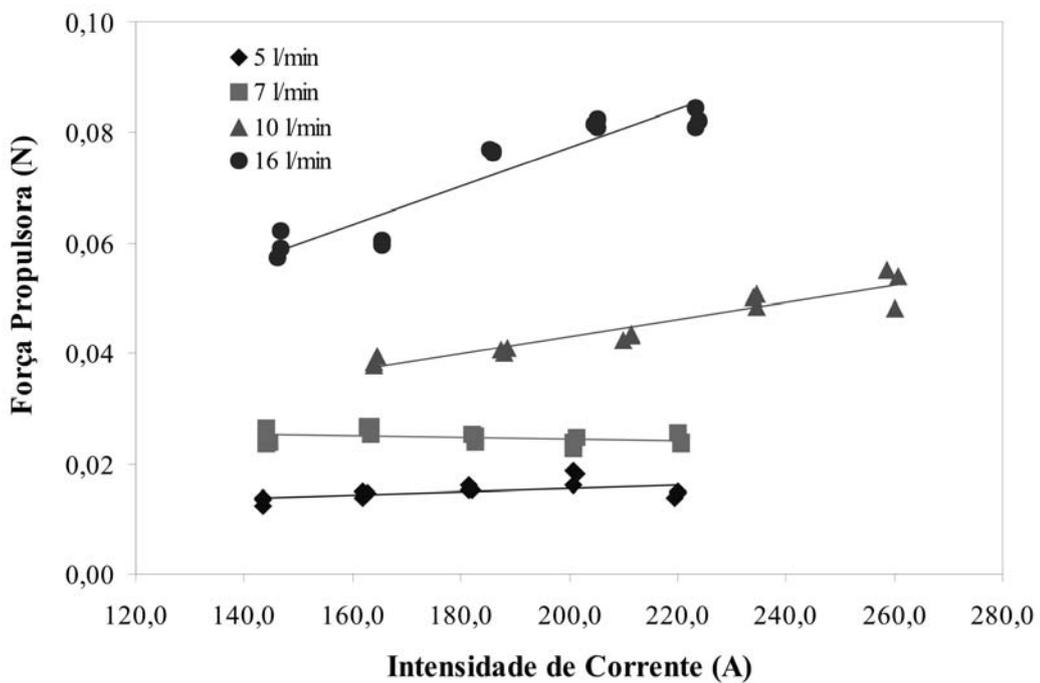


Figura 32. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, X = 10 mm e cone na extremidade do catodo de 60°.

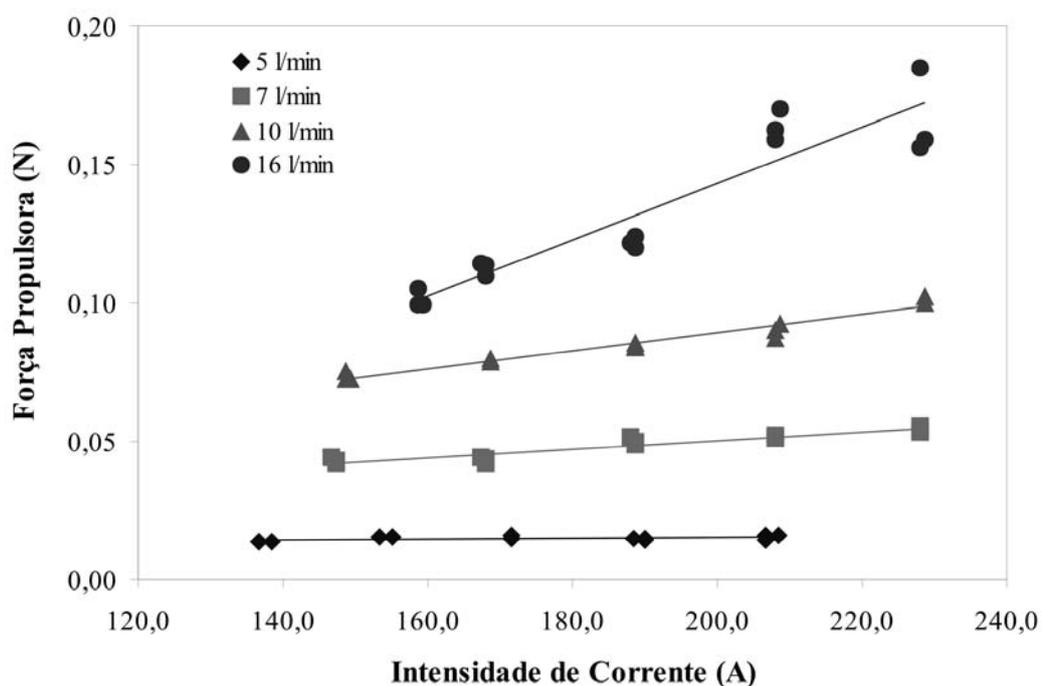


Figura 33. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 15$ mm e cone na extremidade do catodo de 60° .

As **Figuras 34, 35 e 36** apresentam a força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. Para estes experimento foram utilizadas posições relativas X entre os eletrodos de 5 mm, 10 mm e 15 mm, respectivamente e ângulo na extremidade do catodo de 45° . Para esses experimentos não ocorreram variações significativas na força propulsora com o aumento da corrente elétrica, mas, em todos, a força propulsora aumentou com o aumento da vazão do gás para os mesmos valores de corrente elétrica.

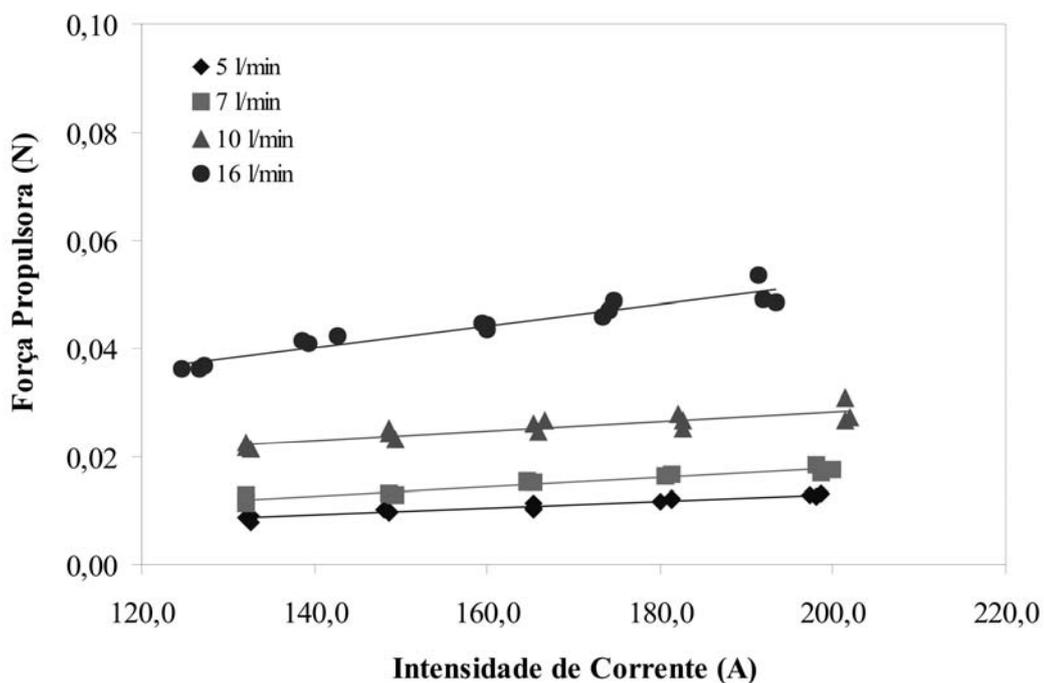


Figura 34. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 5$ mm e cone na extremidade do catodo de 45° .

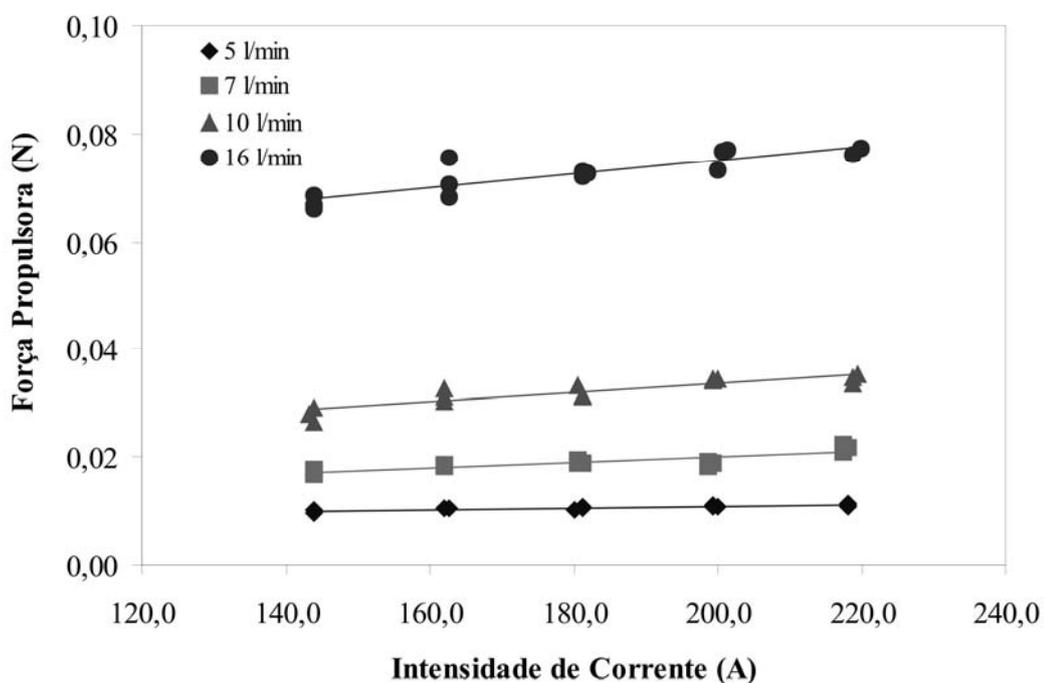


Figura 35. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 10$ mm e cone na extremidade do catodo de 45° .

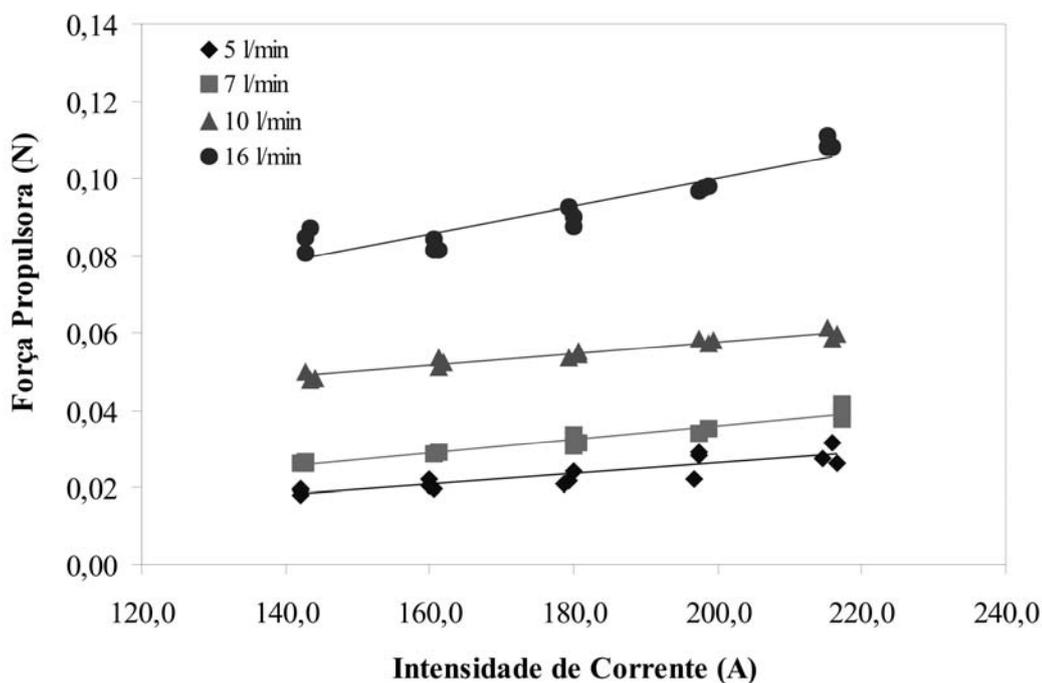


Figura 36. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 15$ mm e cone na extremidade do catodo de 45° .

As **Figuras 37, 38 e 39** apresentam a força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. Para estes experimento foram utilizadas posições relativas X entre os eletrodos de 5 mm, 10 mm e 15 mm, respectivamente, e ângulo na extremidade do catodo de 30° . Os gráficos mostram um aumento da força propulsora com o aumento da vazão do gás para todos os experimentos. Para o experimentos realizados com vazão do gás de 16 l/min, posição $X = 5$ mm e $X = 10$ mm e ângulo na extremidade do catodo de 30° houve um aumento significativo da força propulsora com o aumento da corrente elétrica e para os demais experimentos não houve variações significativas.

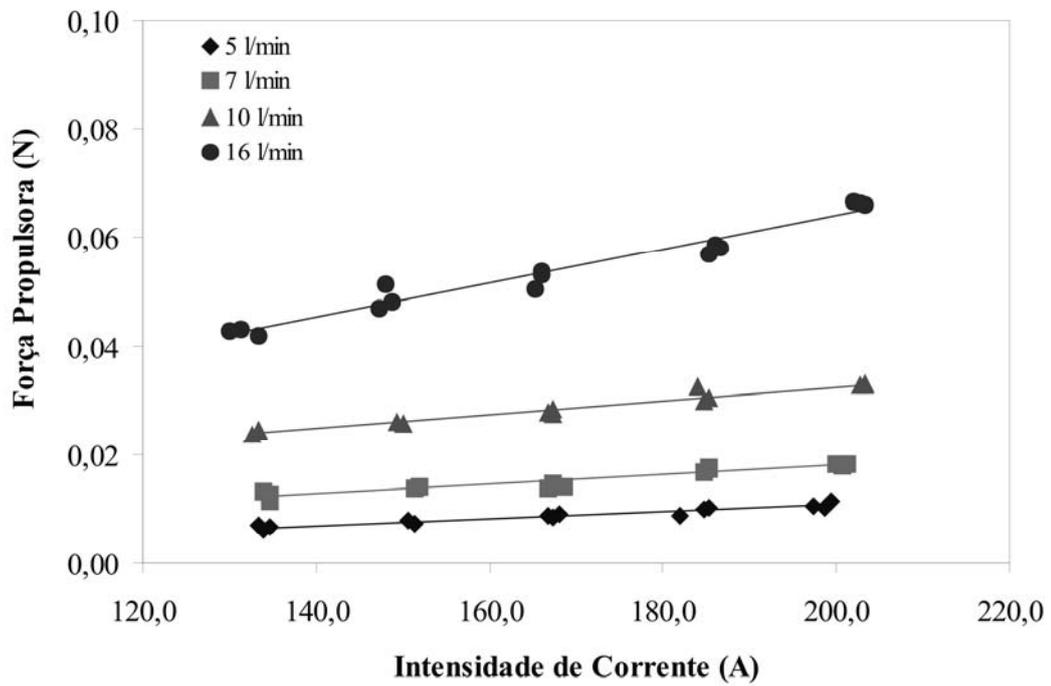


Figura 37. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 5$ mm e cone na extremidade do catodo de 30° .

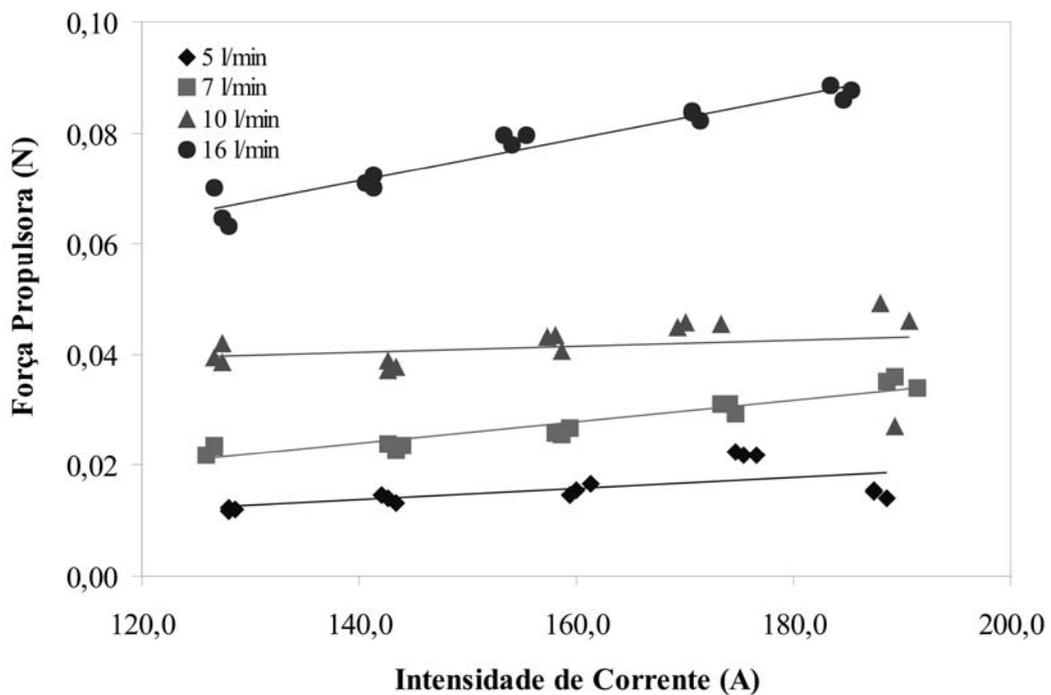


Figura 38. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 10$ mm e cone na extremidade do catodo de 30° .

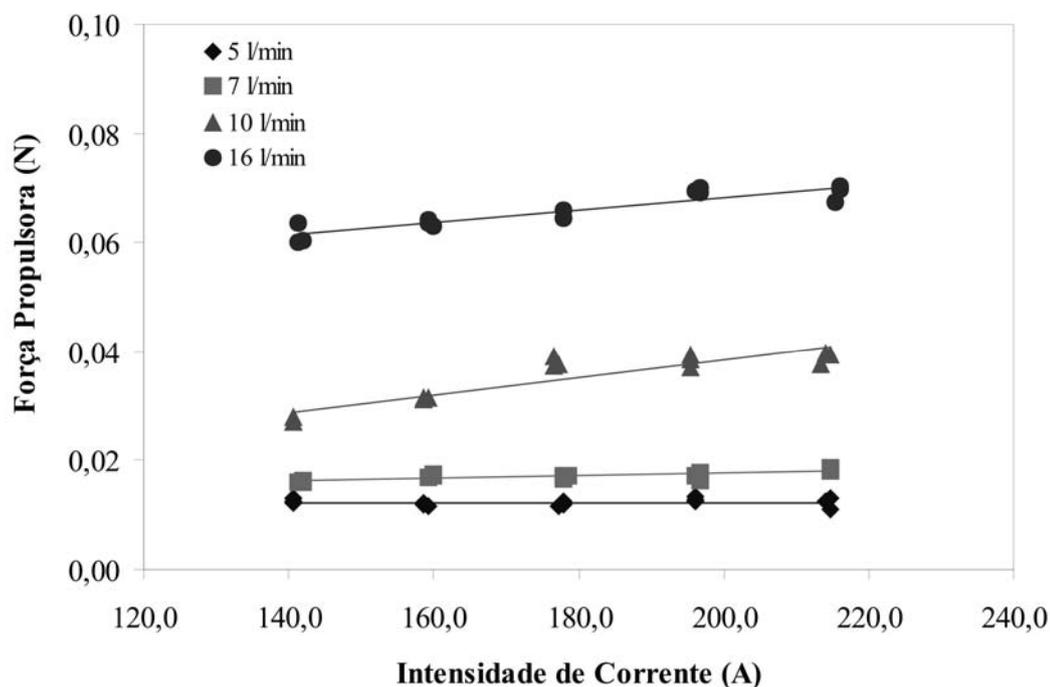


Figura 39. Força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás, $X = 15$ mm e cone na extremidade do catodo de 30° .

As variações da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo são esboçadas pelas **Figuras 40, 41, 42 e 43**, onde a posição relativa entre os eletrodos foi de $X = 5$ mm e as vazões de gás na câmara de 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min, respectivamente.

Para esses experimentos observa-se que a força propulsora quase não varia em relação aos ângulos na extremidade do catodo, com exceção do experimento realizado com uma vazão de 5 l/min, no qual quanto maior o ângulo da extremidade cônica do catodo maior a força propulsora ($60^\circ > 45^\circ > 30^\circ$).

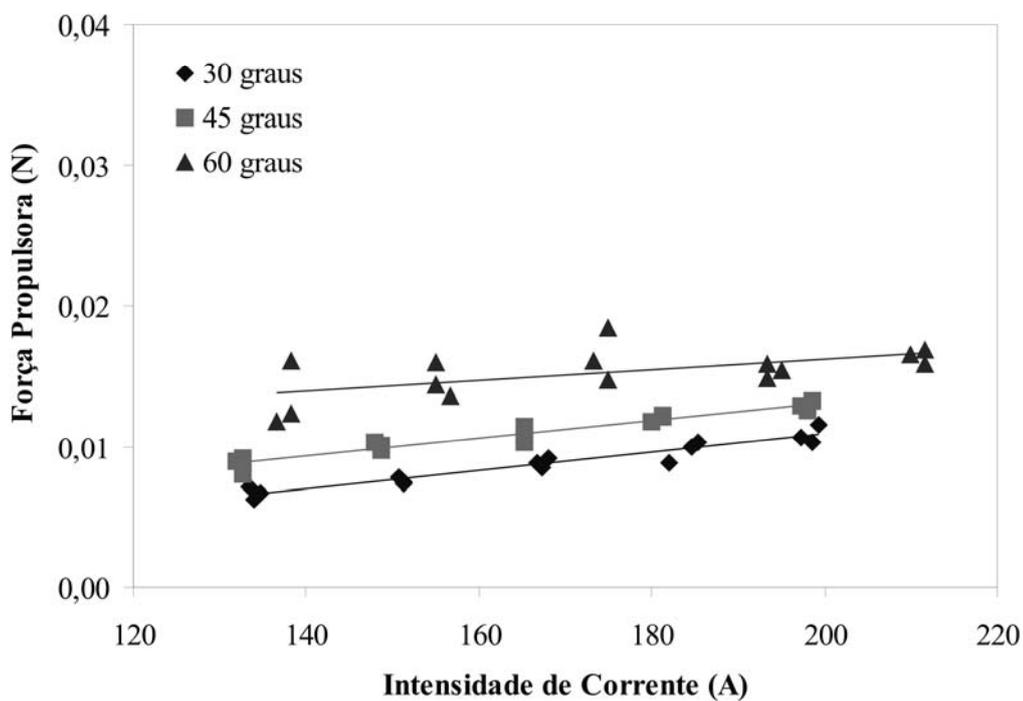


Figura 40. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 5 mm e vazão de gás na câmara de 5 l/min.

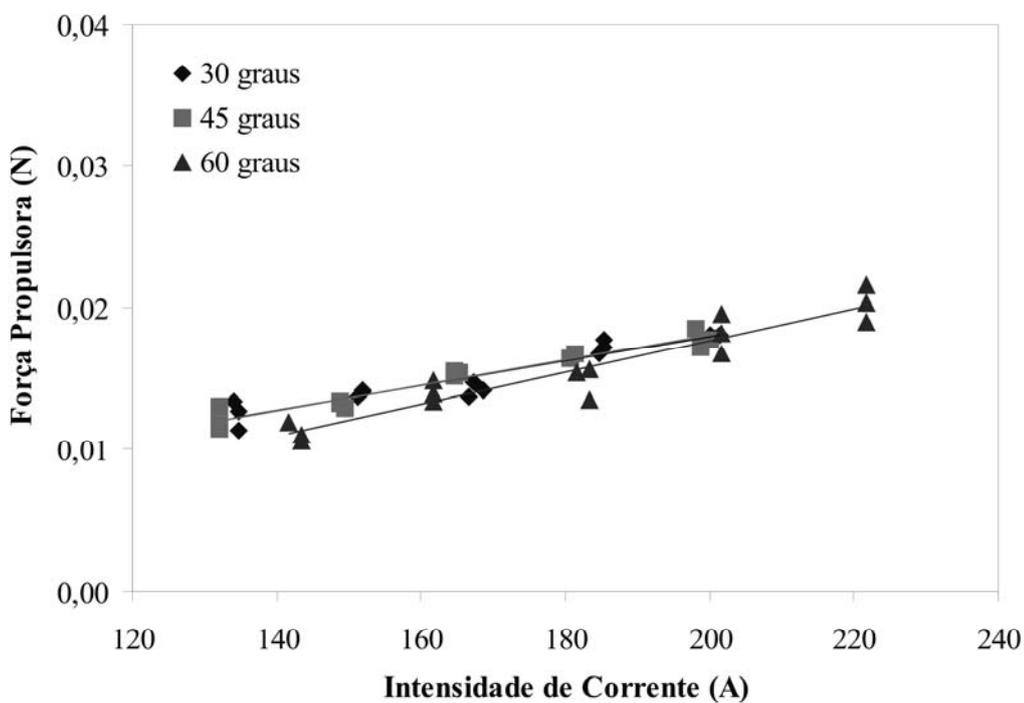


Figura 41. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 5 mm e vazão de gás na câmara de 7 l/min.

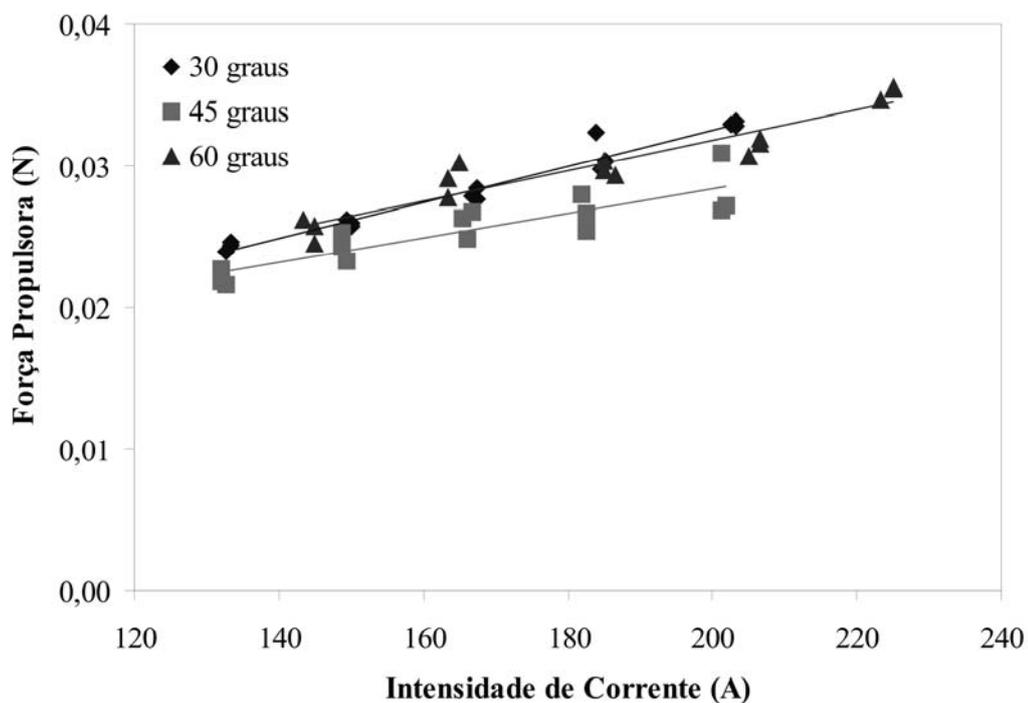


Figura 42. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 5 mm e vazão de gás na câmara de 10 l/min.

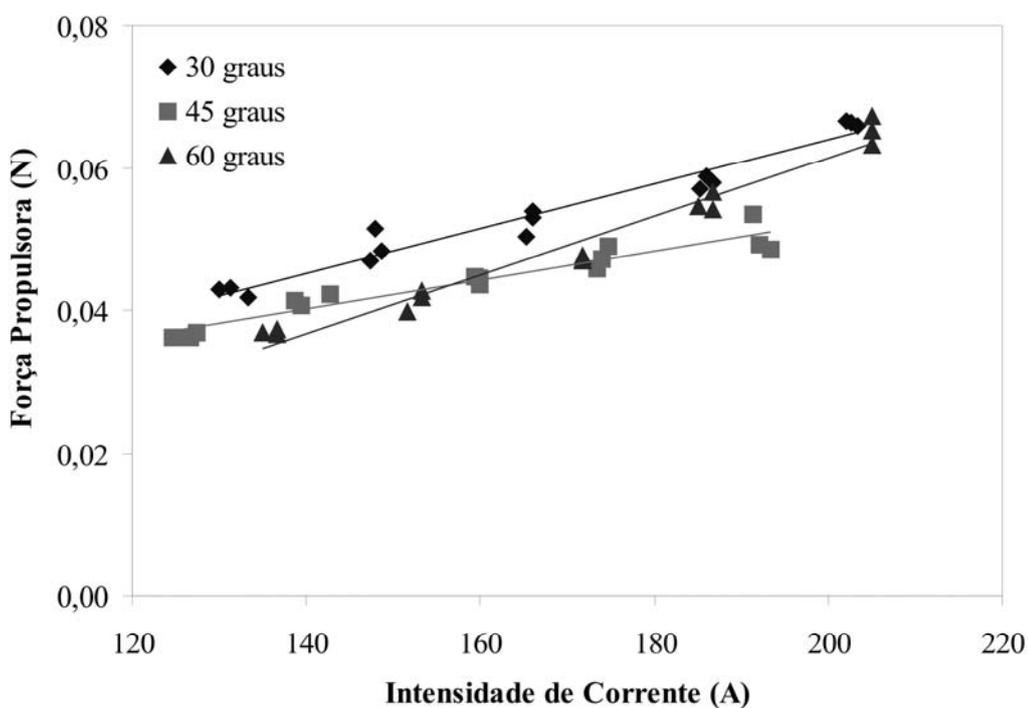


Figura 43. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 5 mm e vazão de gás na câmara de 16 l/min.

A variação da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo são esboçadas pelas **Figuras 44, 45, 46 e 47**, onde a posição relativa entre os eletrodos foi de $X = 10$ mm e as vazões de gás na câmara de 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min, respectivamente. Um comportamento diferente do descrito anteriormente para força propulsora em função da intensidade de corrente foi observado, ou seja, nesses experimentos a extremidade cônica com ângulo de 30° fornece maior propulsão que a extremidade com ângulo de 60° , que, por sua vez, fornece propulsão maior que a extremidade com ângulo de 45° .

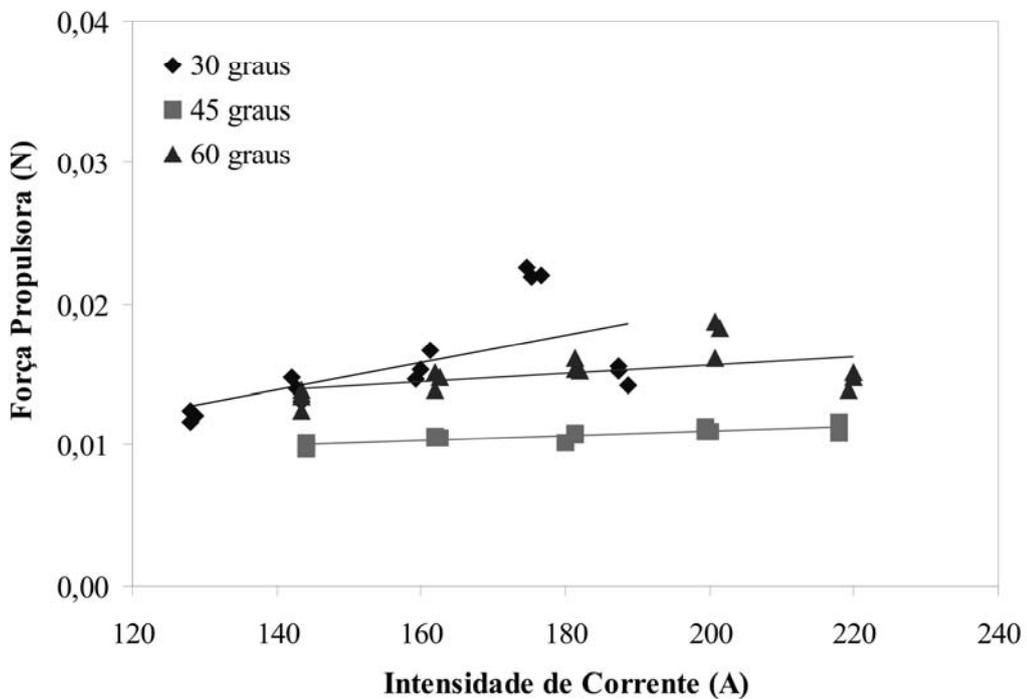


Figura 44. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 10$ mm e vazão de gás na câmara de 5 l/min.

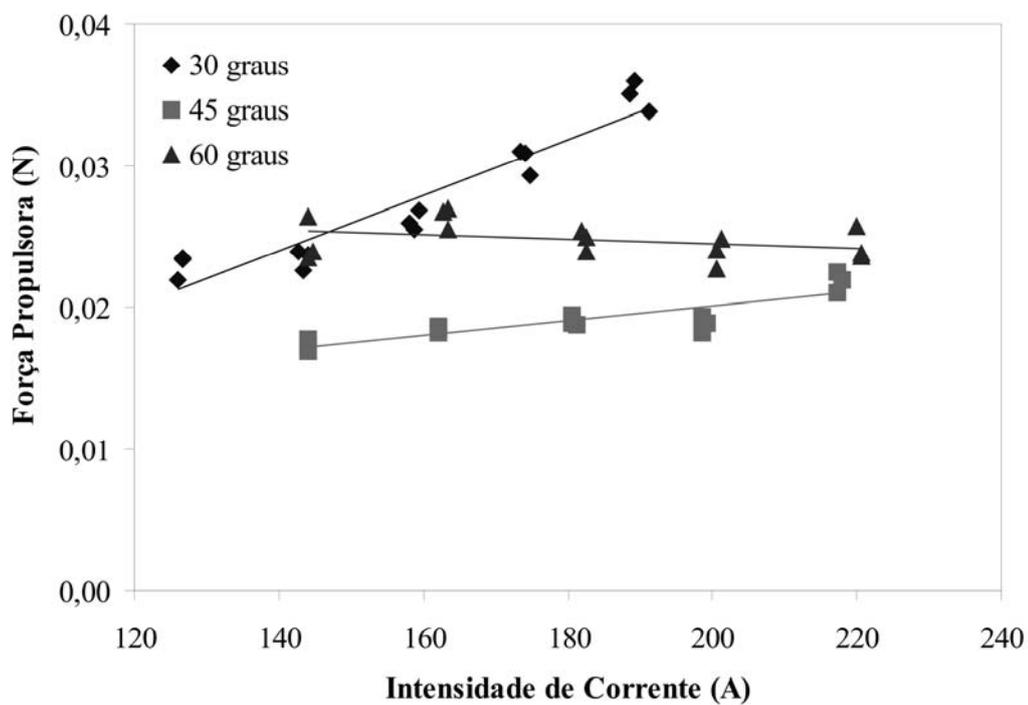


Figura 45. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 10 mm e vazão de gás na câmara de 7 l/min.

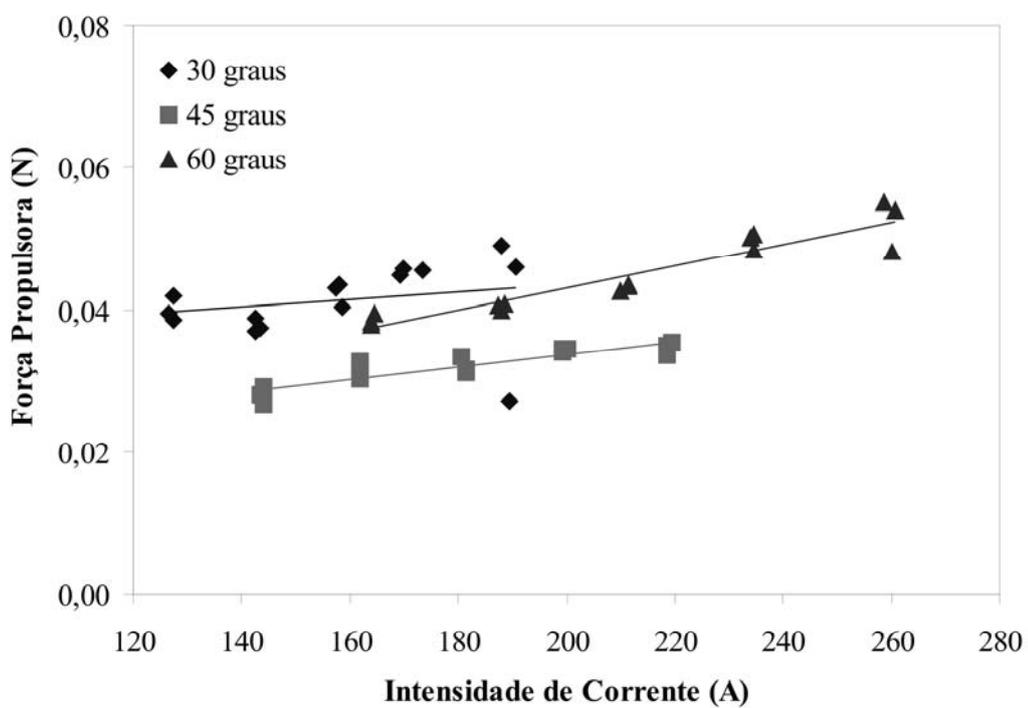


Figura 46. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 10 mm e vazão de gás na câmara de 10 l/min.

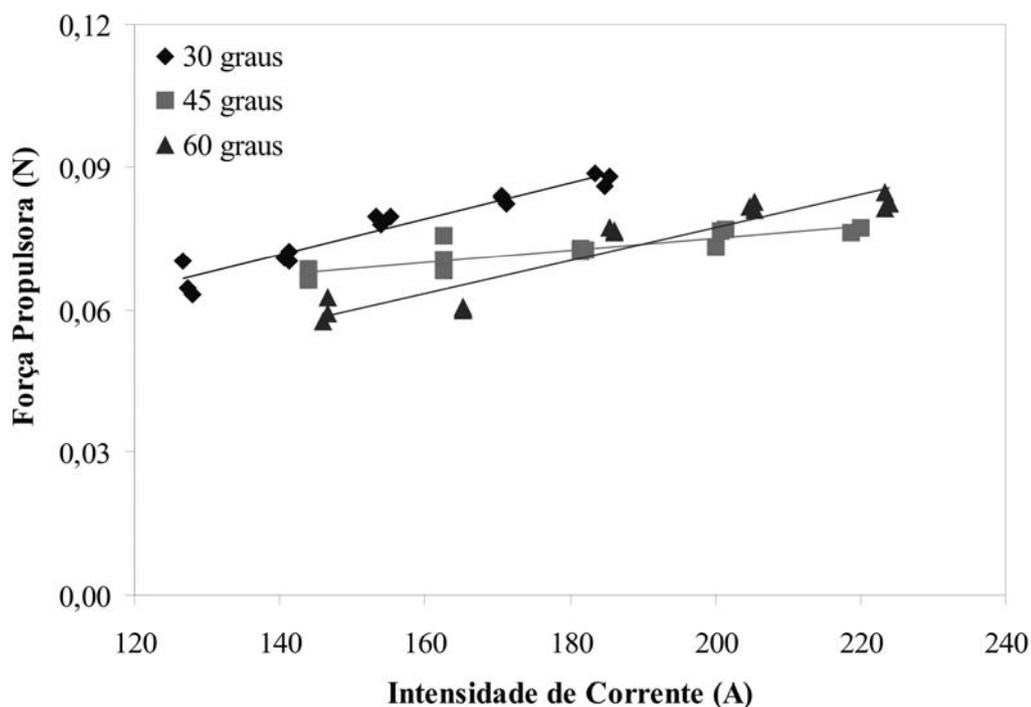


Figura 47. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição $X = 10$ mm e vazão de gás na câmara de 16 l/min.

A variação da força propulsora em função da intensidade de corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo são esboçadas pelas **Figuras 48, 49, 50 e 51**, onde a posição relativa entre os eletrodos foi de $X = 15$ mm e as vazões de gás na câmara de 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min, respectivamente. A força propulsora para os experimentos realizados com vazões do gás de 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min é significativamente maior para os experimentos com ângulo de 60° do que os experimentos com outros ângulos. Para o experimento realizado com vazão do gás de 5 l/min a força propulsora é maior para os experimentos realizados com ângulo de 45° em relação aos experimentos realizados com outros ângulos.

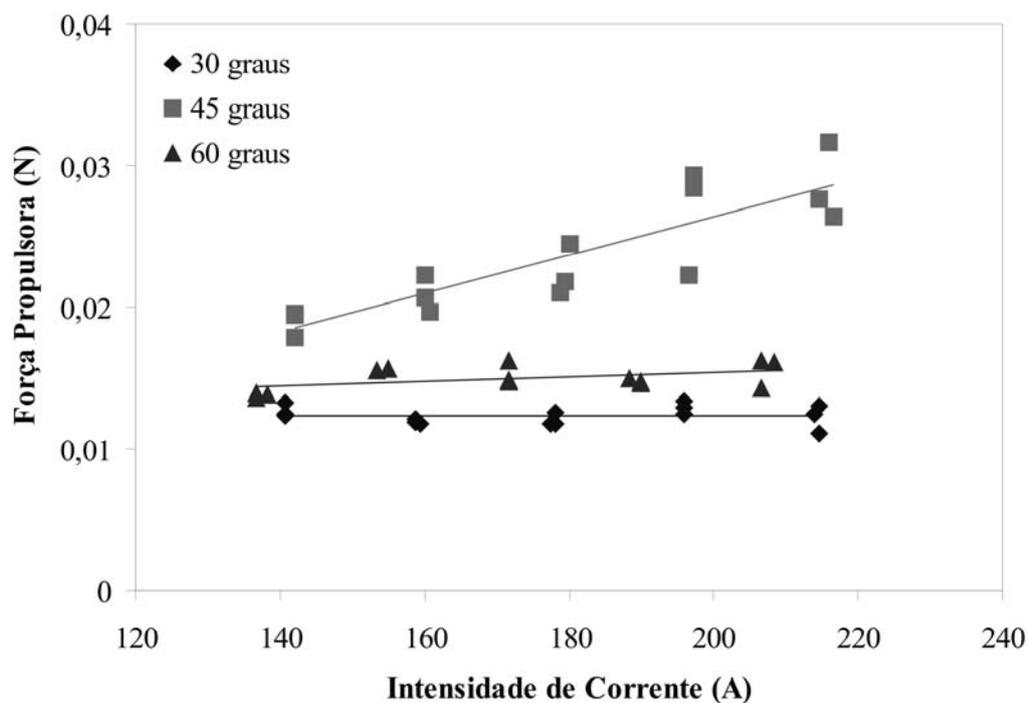


Figura 48. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 15 mm e vazão de gás na câmara de 5 l/min.

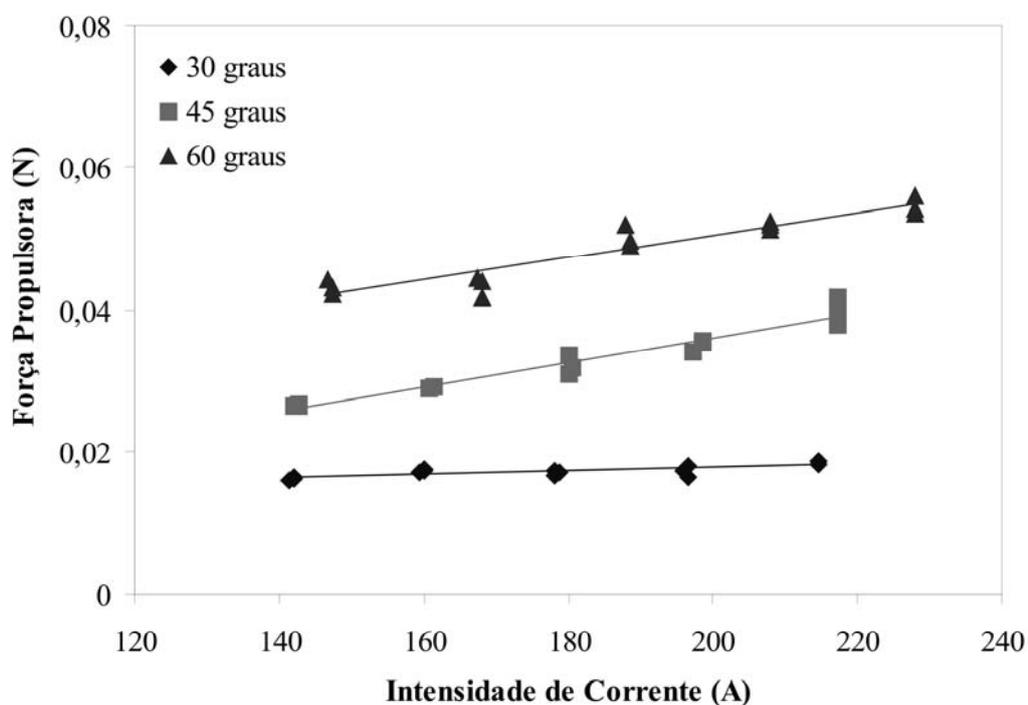


Figura 49. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 15 mm e vazão de gás na câmara de 7 l/min.

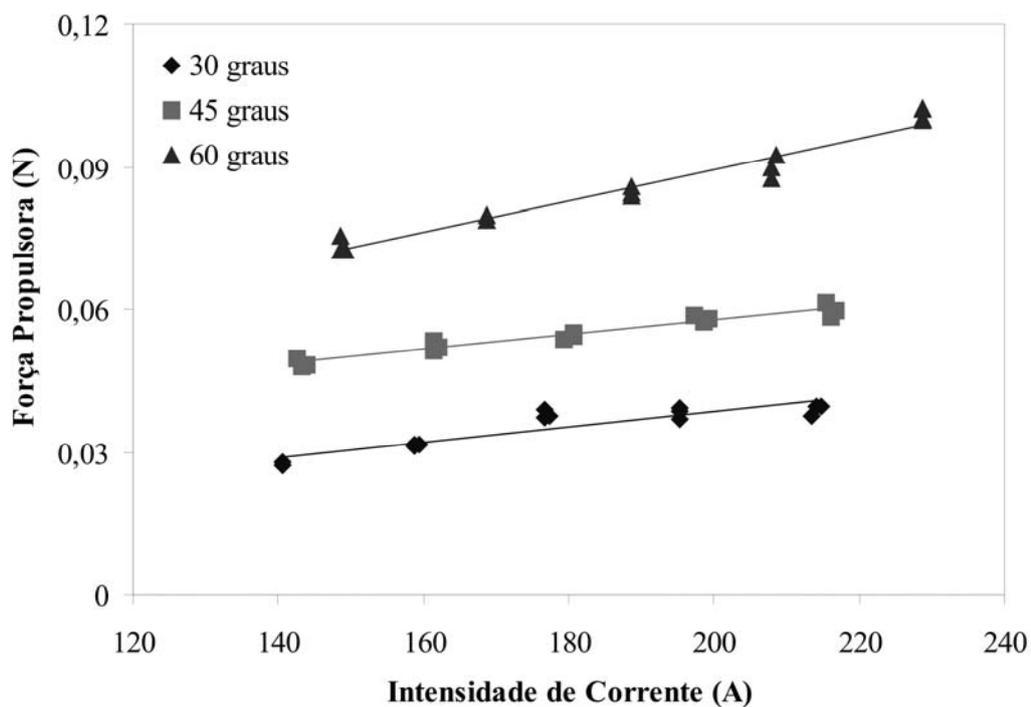


Figura 50. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 15 mm e vazão de gás na câmara de 10 l/min.

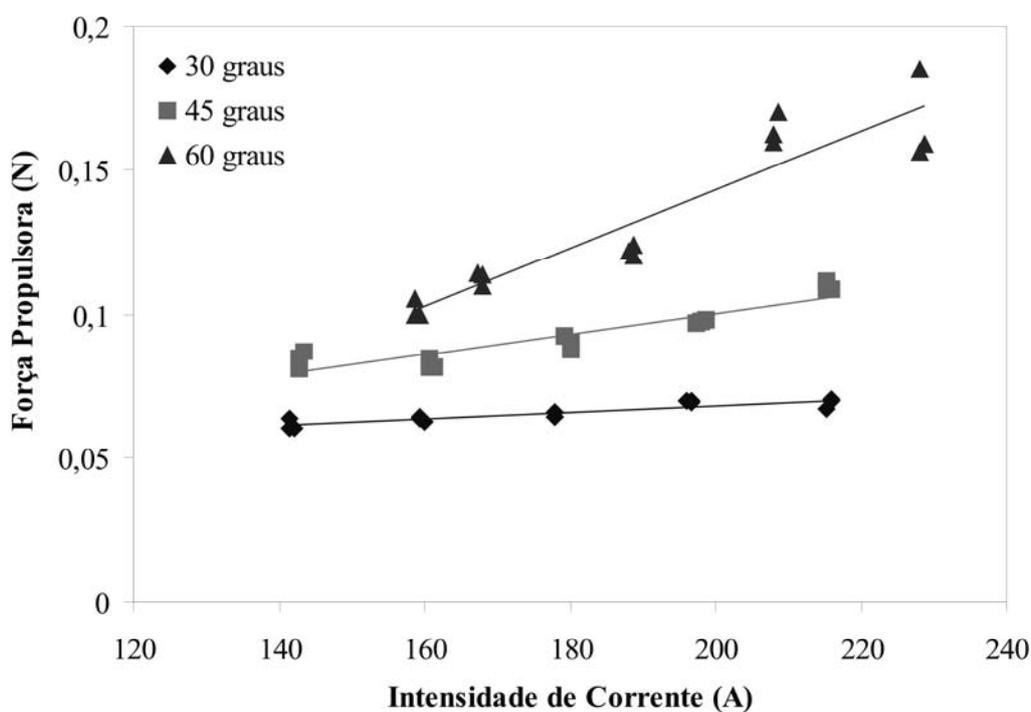


Figura 51. Força propulsora em função da intensidade de corrente para diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo. Posição X = 15 mm e vazão de gás na câmara de 16 l/min.

A influência da posição X entre os eletrodos (**Figura 16**) na propulsão é apresentada na **Figura 52** até **63**, onde são plotados os gráficos da força propulsora em função da intensidade de corrente para os experimentos realizados com ângulo de 60°, 45° e 30° na extremidade do catodo e vazões de 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min.

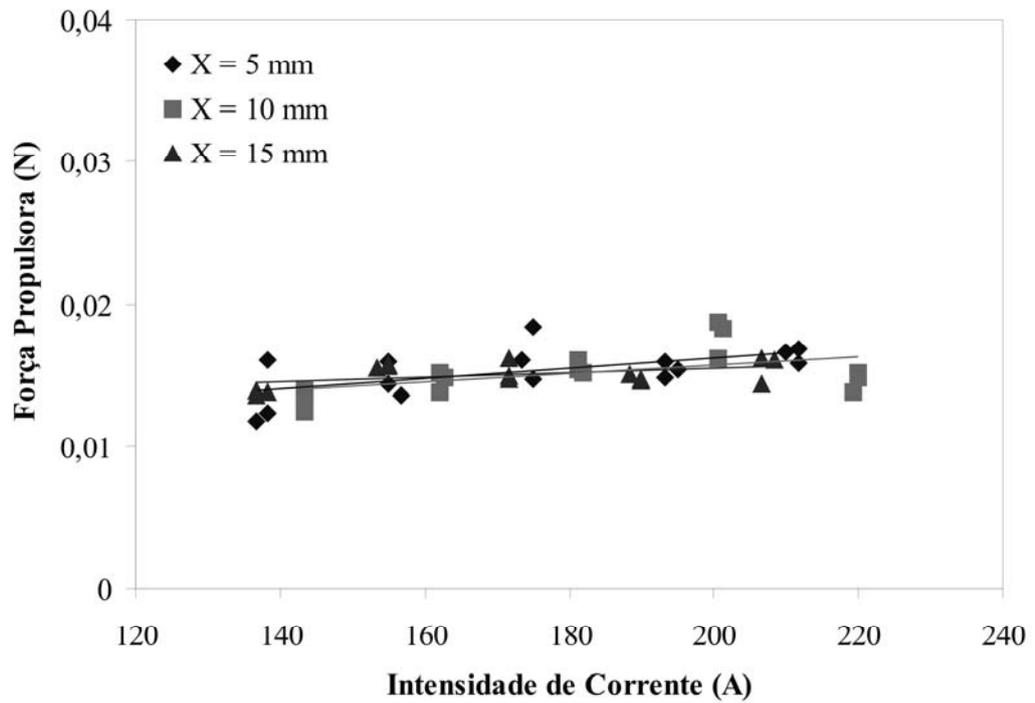


Figura 52. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 5 l/min.

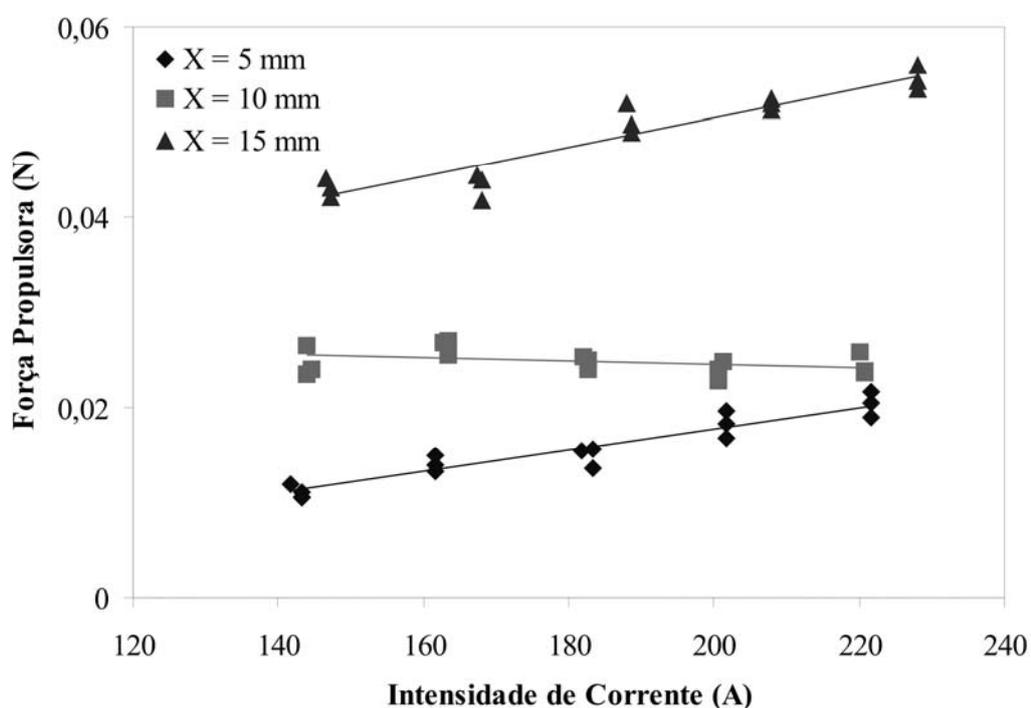


Figura 53. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 7 l/min.

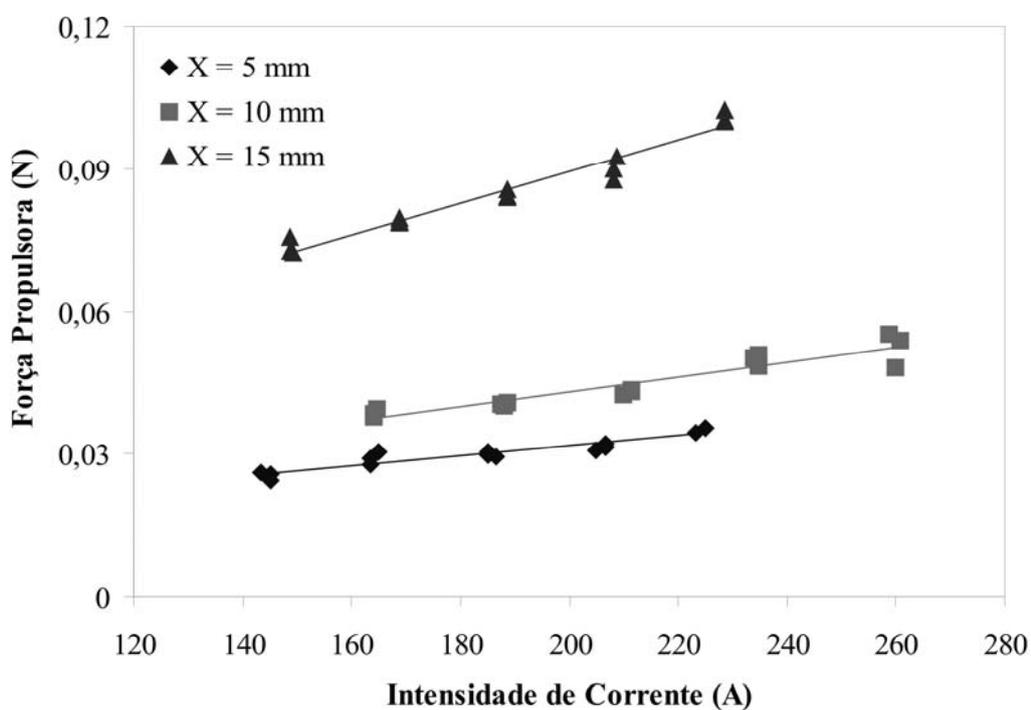


Figura 54. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 10 l/min.

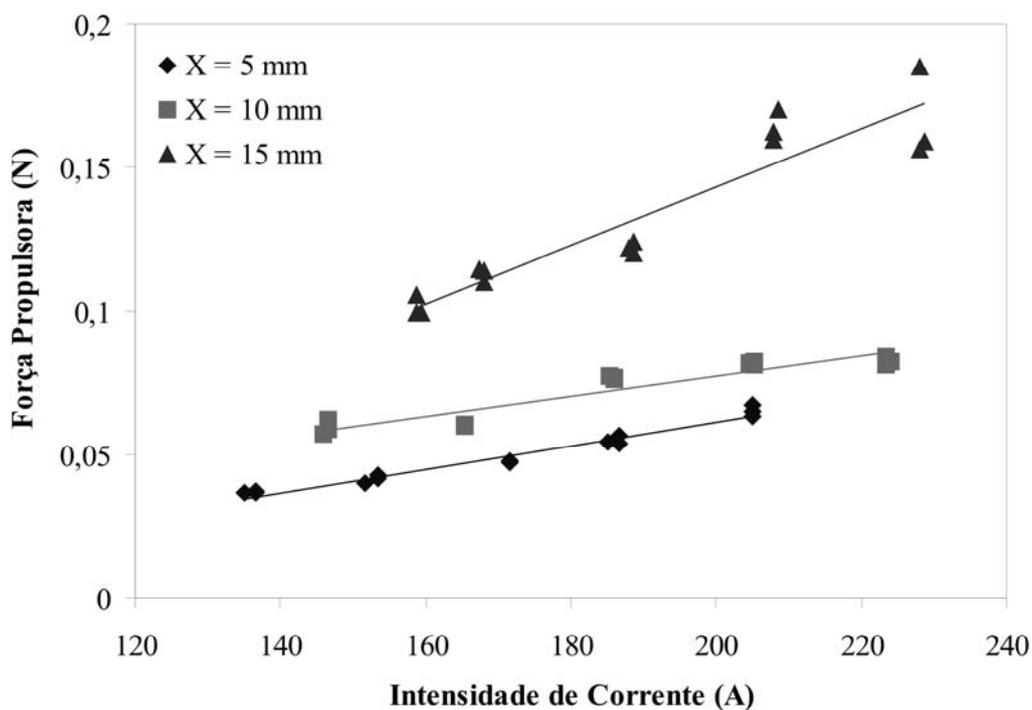


Figura 55. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 60° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 16 l/min.

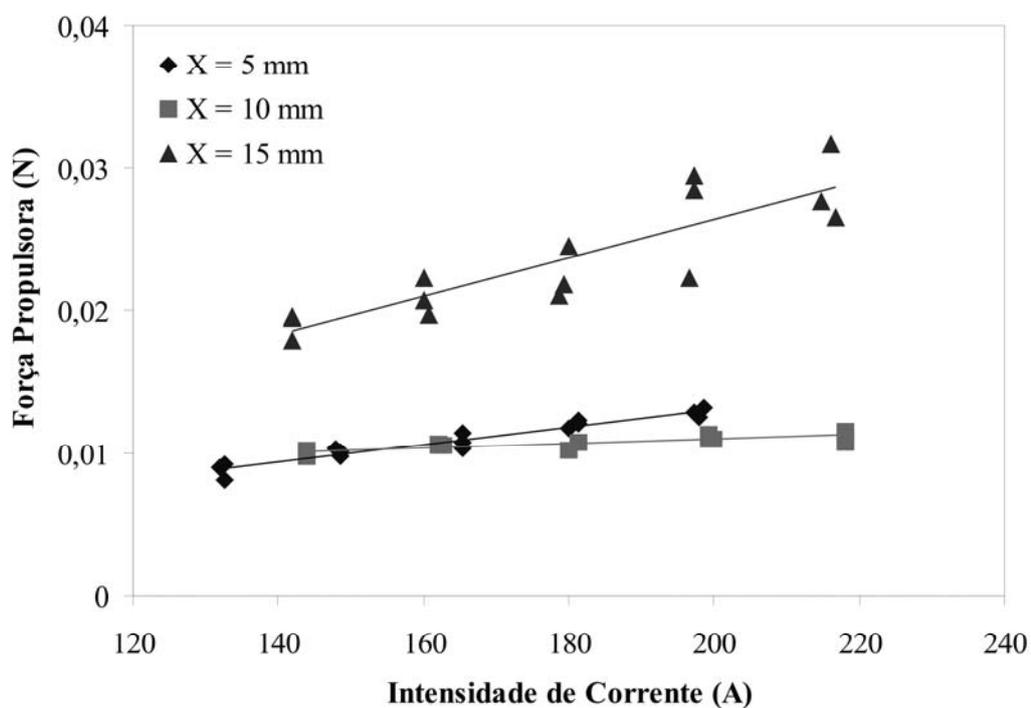


Figura 56. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 5 l/min.

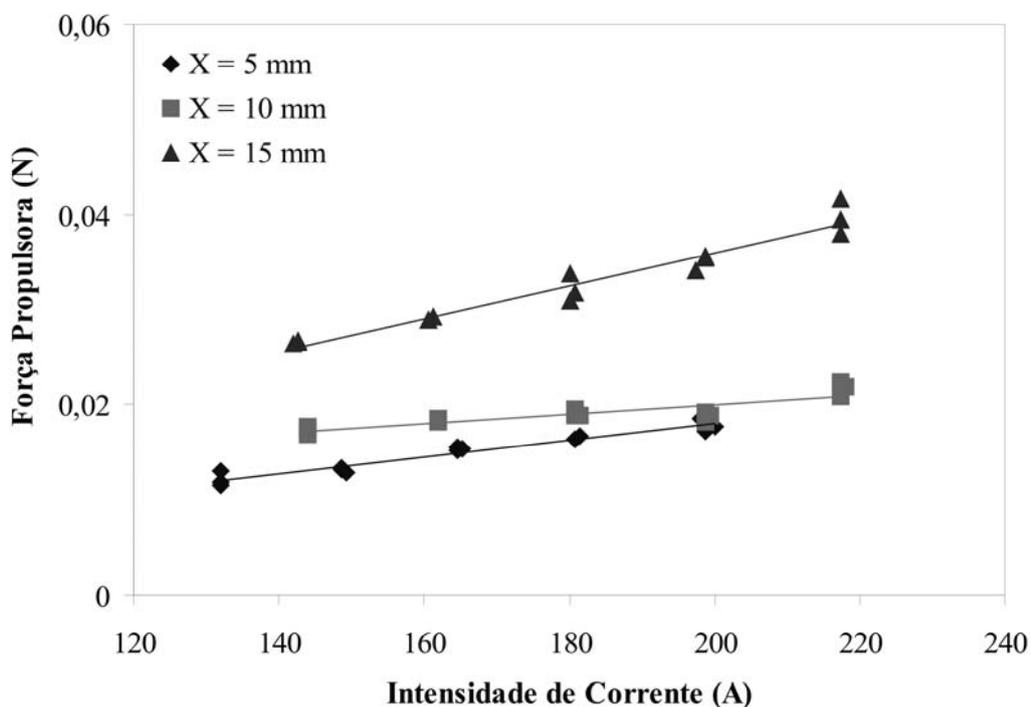


Figura 57. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 7 l/min.

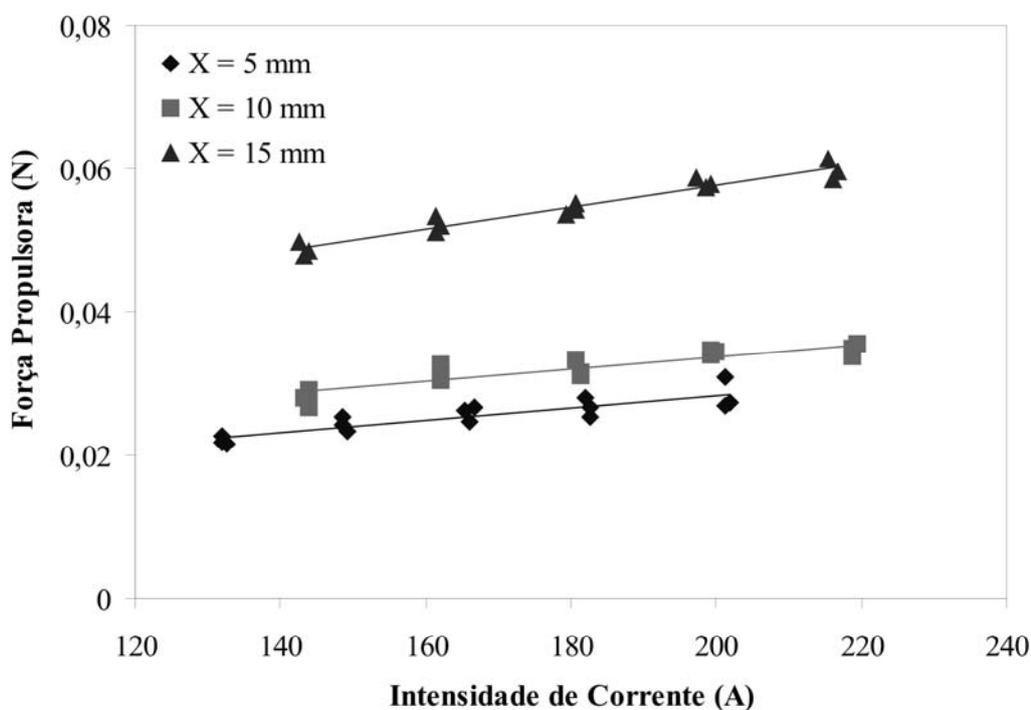


Figura 58. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 10 l/min.

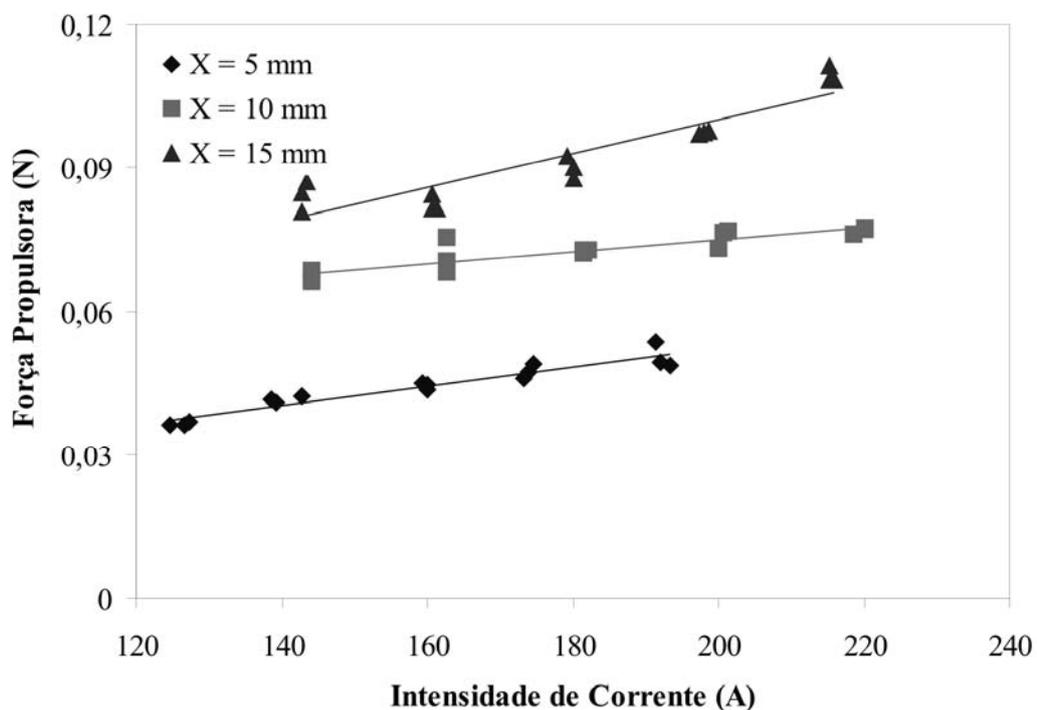


Figura 59. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 45° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 16 l/min.

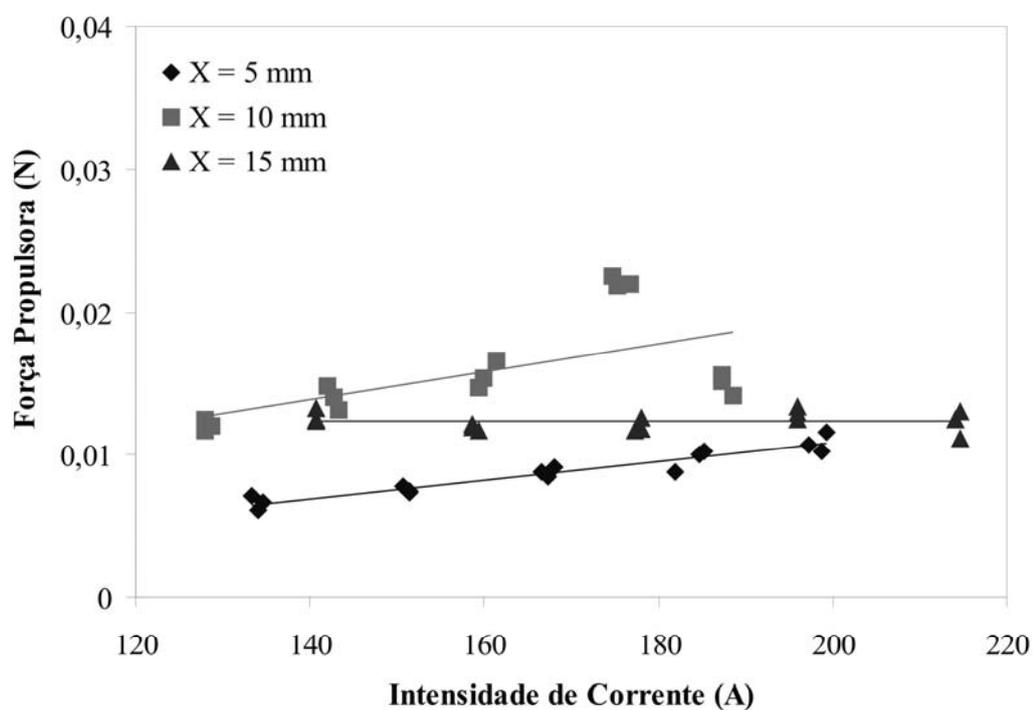


Figura 60. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 5 l/min.

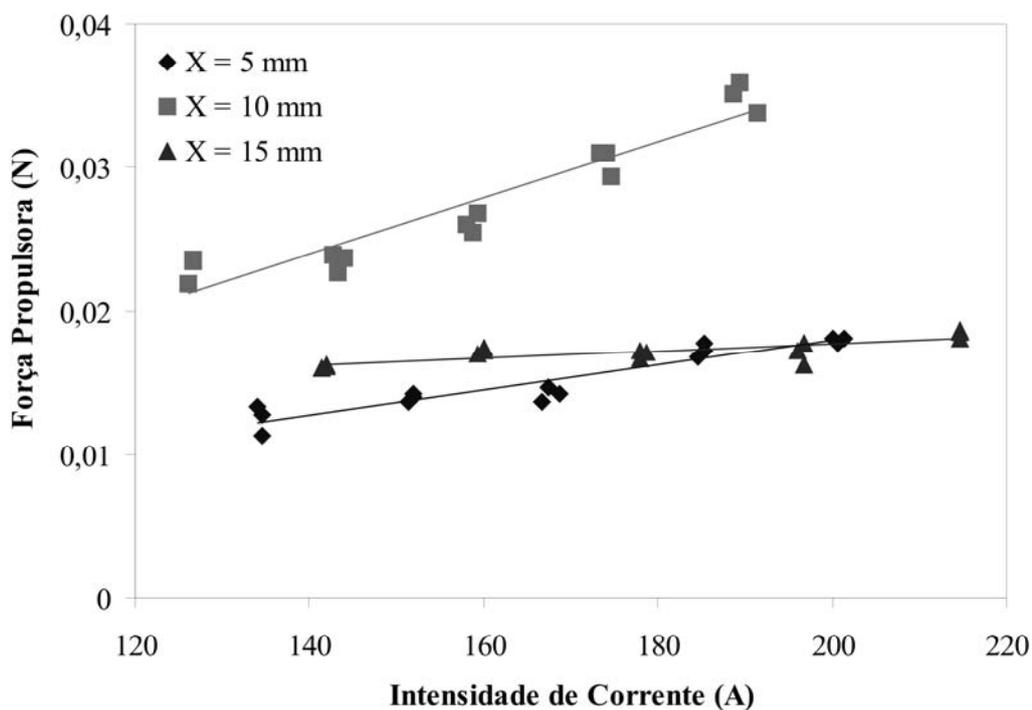


Figura 61. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 7 l/min.

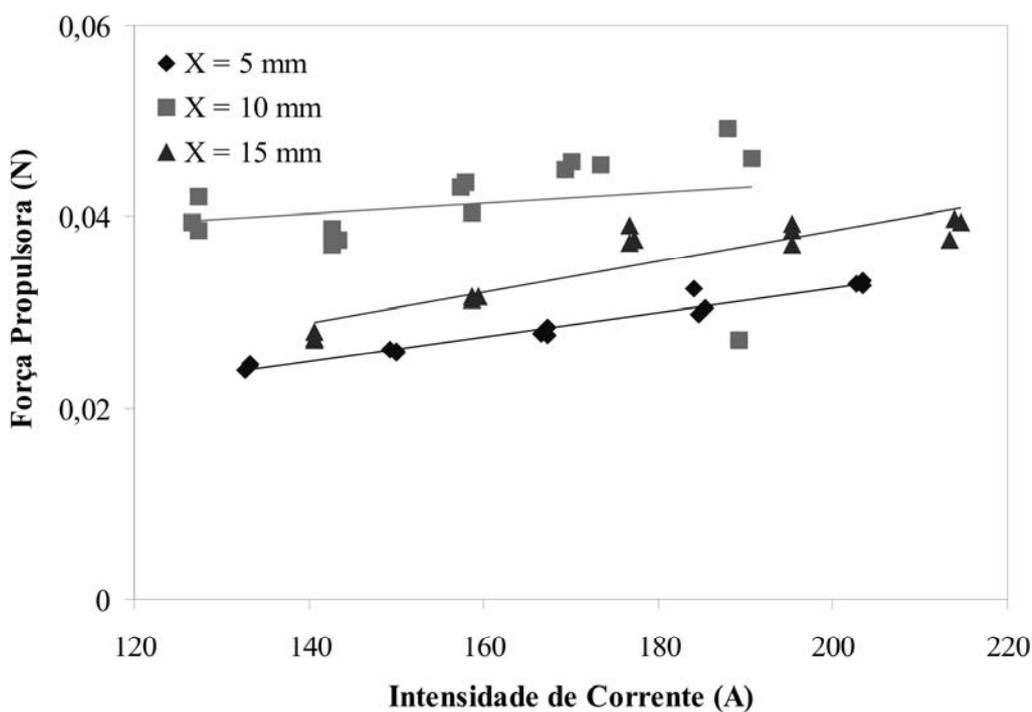


Figura 62. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 10 l/min.

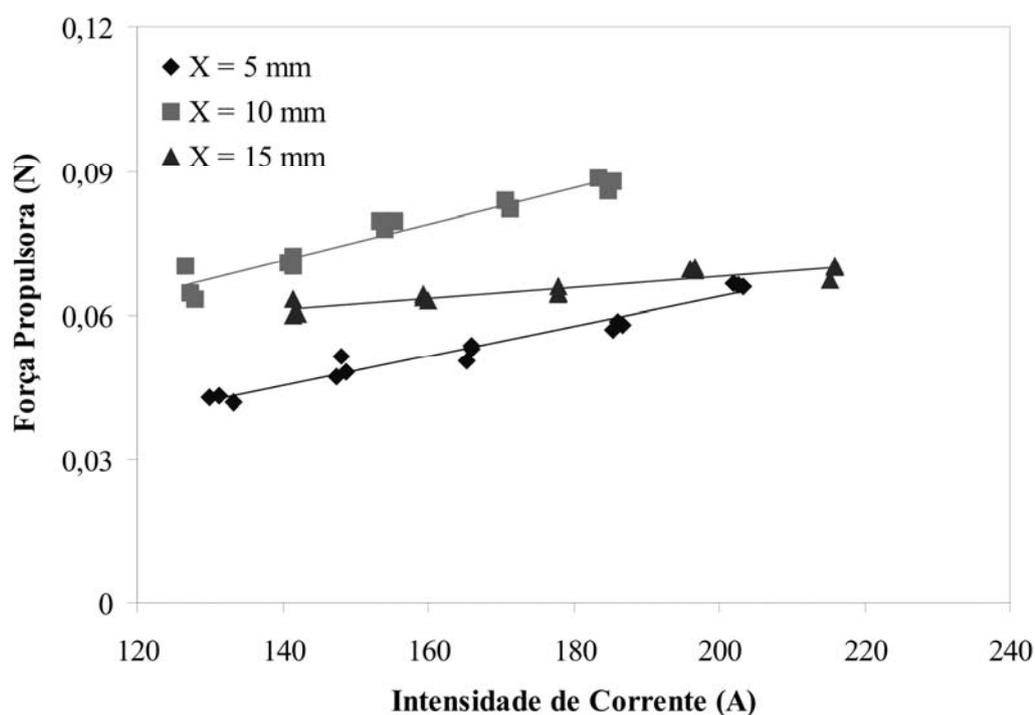


Figura 63. Força propulsora em função da intensidade de corrente comparando as diferentes posições relativas X entre os eletrodos. Experimentos realizados com ângulo de 30° na extremidade cônica do catodo e vazões do gás de 16 l/min.

O catodo posicionado em X = 15 mm (posição relativa entre os eletrodos) apresenta maior propulsão para os experimentos realizados com vazões do gás de 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min e 16 l/min e ângulos de 60° e 45°; com exceção do experimento com vazões do gás de 5 l/min e extremidade cônica do catodo de 60°, o qual apresenta uma pequena variação na propulsão em relação às posições X entre os eletrodos. Os experimentos realizados com todas as vazões de gás e ângulo de 30° apresentam maior propulsão para a posição X = 10 mm.

A **Figura 64** apresenta a diferença de potencial (d.d.p.) em função da intensidade de corrente elétrica para os experimentos realizados com diferentes vazões de gás, ângulo na extremidade do catodo de 60° e posição relativa entre os eletrodos de X = 5 mm. A d.d.p. aumenta com o aumento da corrente elétrica para as vazões de 7 l/min e 16 l/min, para as outras vazões, praticamente, a d.d.p. se mantém constante.

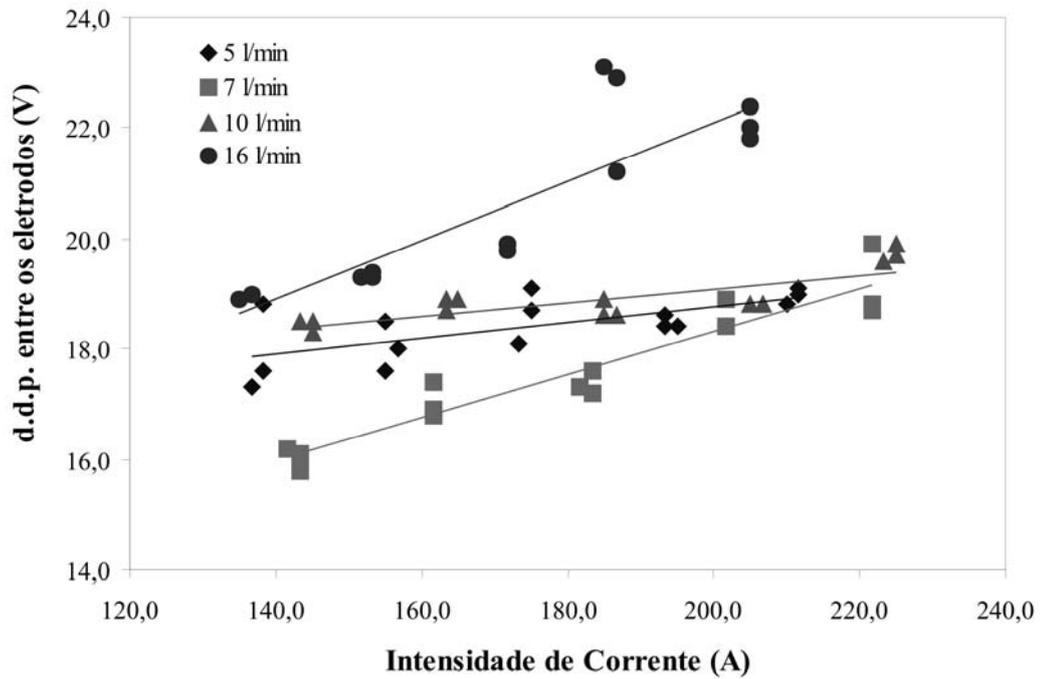


Figura 64. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição X = 5 mm

A **Figura 65** mostra um aumento da d.d.p. com o aumento da intensidade de corrente para as vazões do gás de 5 l/min, 10 l/min e 16 l/min. Para a vazão do gás de 7 l/min a d.d.p. se manteve constante.

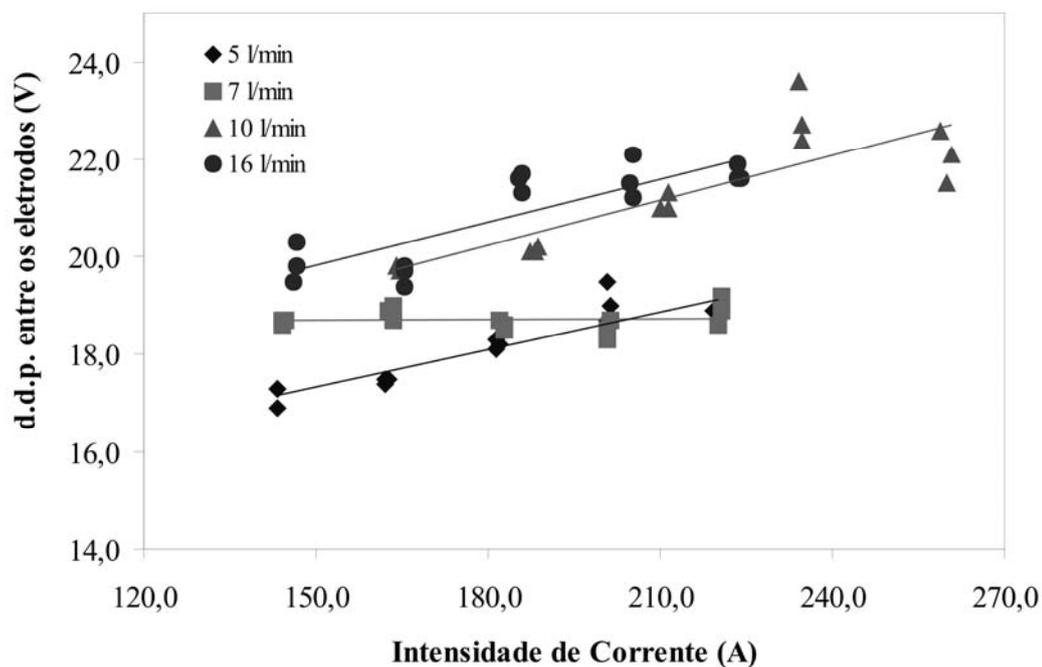


Figura 65. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição X = 10 mm

A **Figura 66** mostra um aumento significativo da d.d.p. com o aumento da intensidade de corrente para as vazões do gás de 5 l/min e 7 l/min. Para as vazões do gás de 10 l/min e 16 l/min a d.d.p. manteve-se constante.

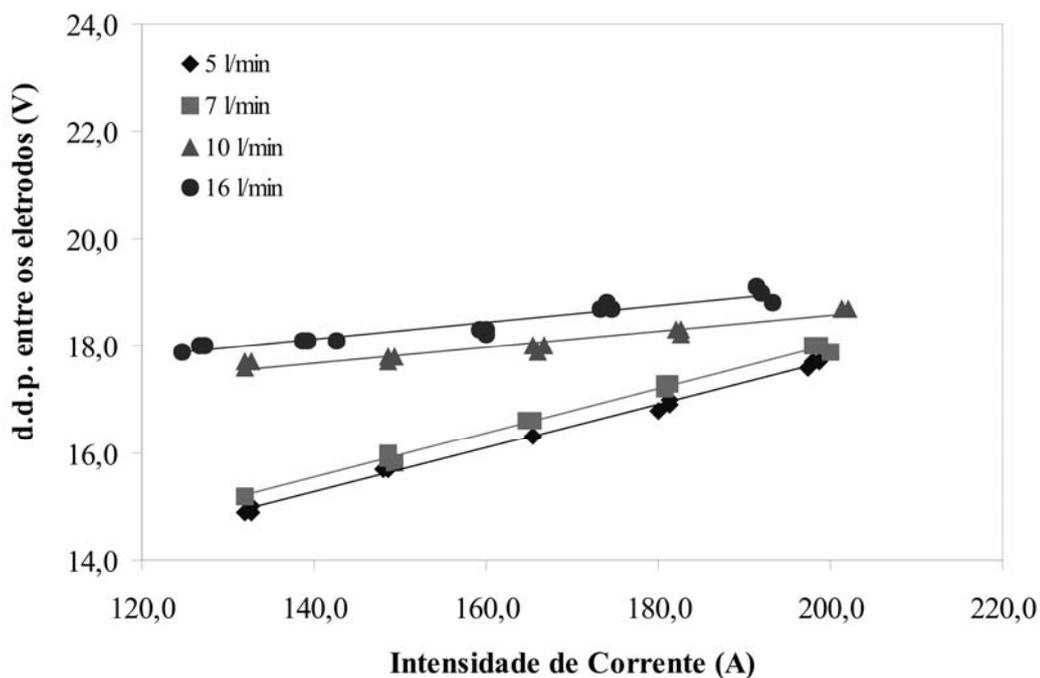


Figura 66. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 45° e posição X = 5 mm

A **Figura 67** mostra um aumento significativo da d.d.p. com o aumento da intensidade de corrente para as vazões do gás de 5 l/min, 7 l/min e 10 l/min. Para a vazão de 16 l/min a d.d.p. manteve-se constante.

A **Figura 68** e **Figura 69** mostram um aumento da d.d.p. com o aumento da intensidade de corrente para todas as vazões de gás.

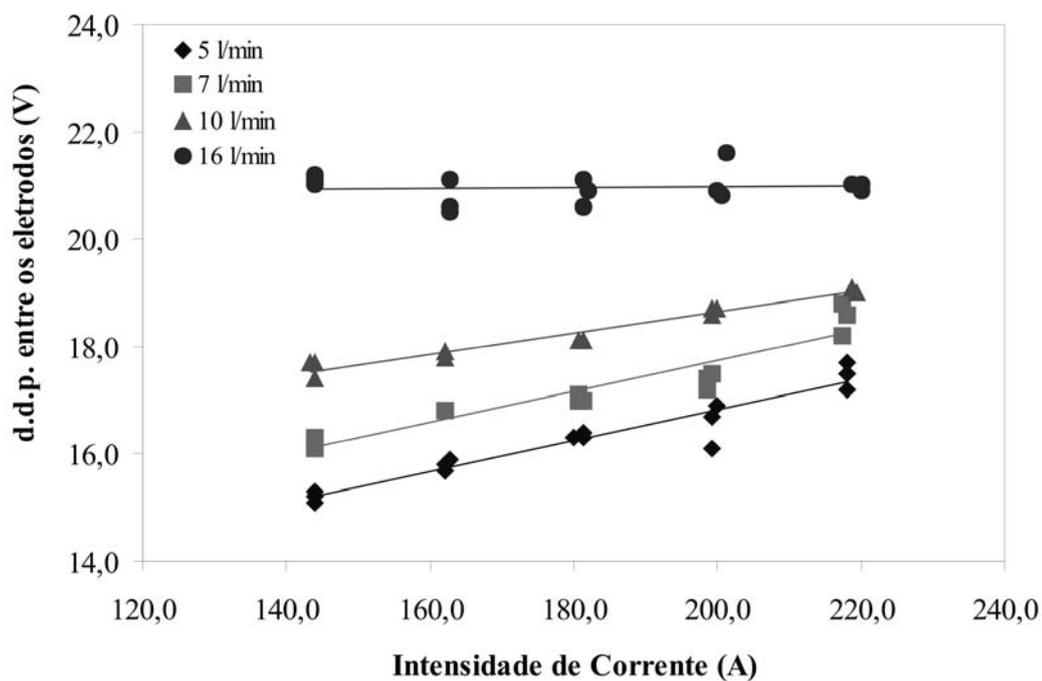


Figura 67. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 45° e posição X = 10 mm.

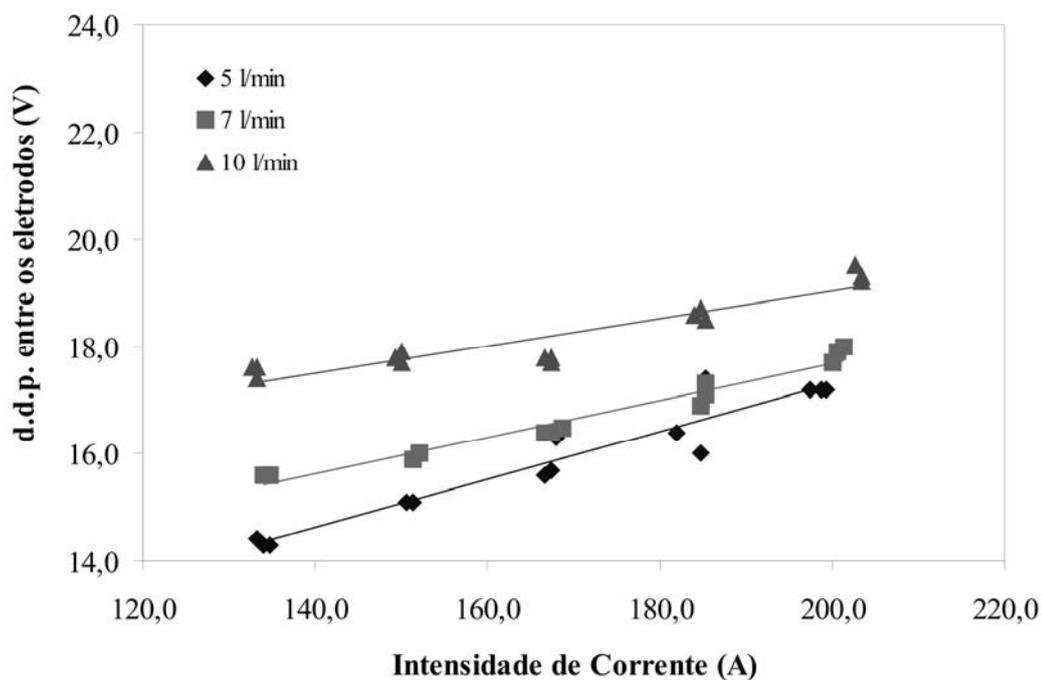


Figura 68. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição X = 5 mm.

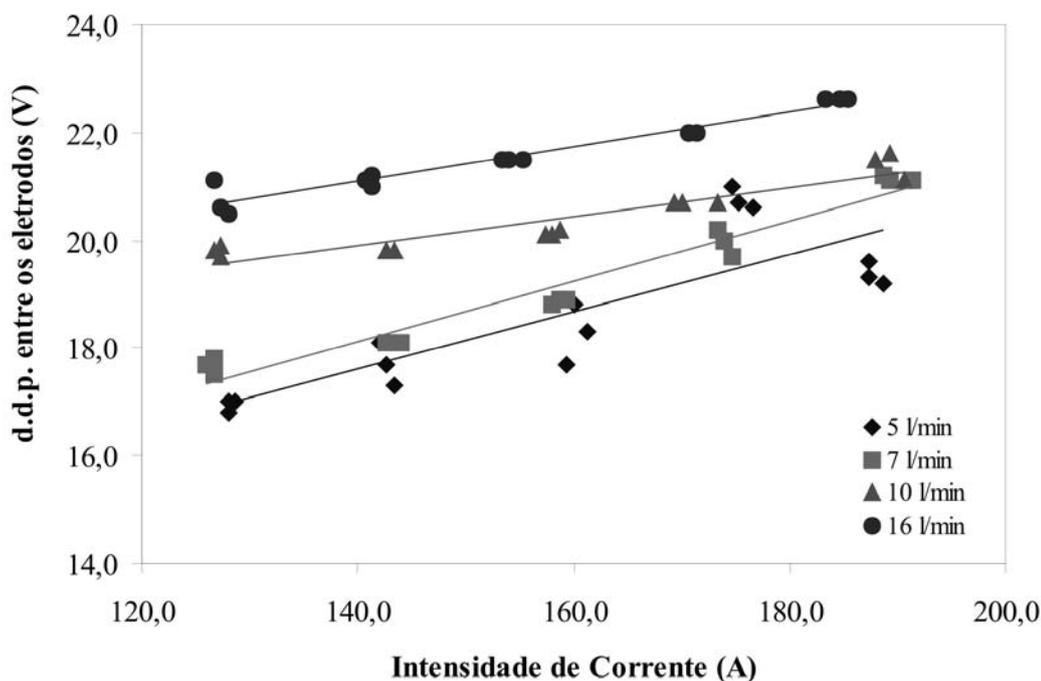


Figura 69. Diferença de potencial em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição X = 10 mm

Os resultados obtidos para a d.d.p. em função da intensidade de corrente (**Figuras 64 à 69**) mostram, também, que a d.d.p. aumenta significativamente com o aumento da vazão do gás para uma mesma intensidade de corrente elétrica. Isso ocorre devido a necessidade de aumentar a energia de dissociação das moléculas internas a câmara do dispositivo. Esse resultado é semelhante ao obtido para o dispositivo MPDT-1.

A **Figura 70** apresenta a variação da temperatura (ΔT) no fluxo de água, utilizado na refrigeração do anodo, em função da corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. A posição relativa entre os eletrodos foi de X = 5 mm e ângulo na extremidade do catodo de 60°.

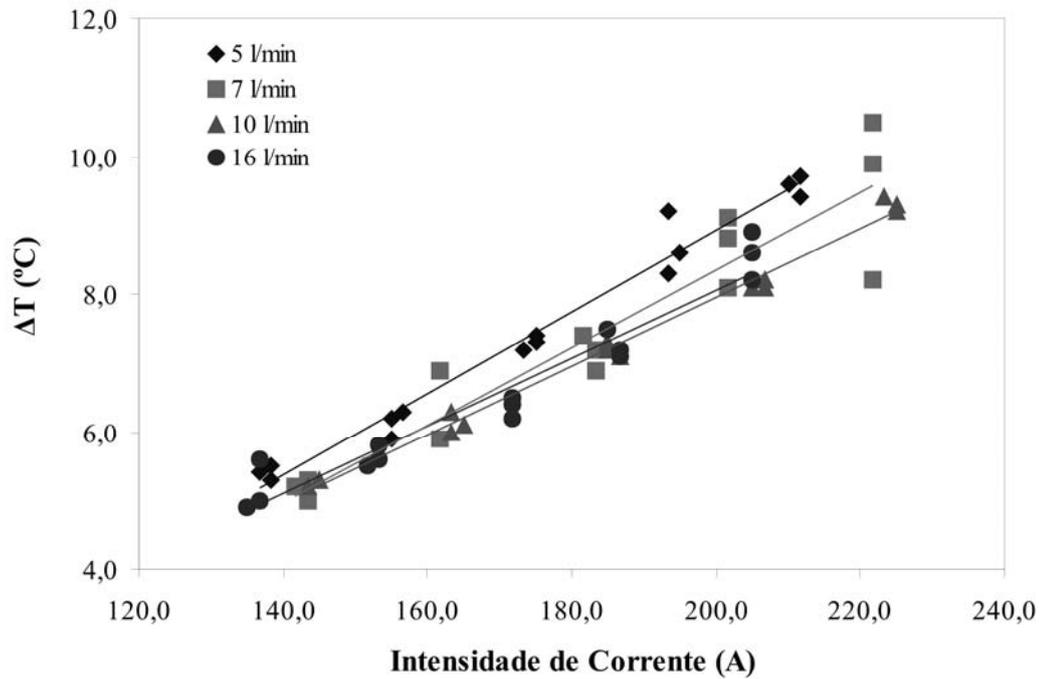


Figura 70. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição relativa X entre os eletrodos de 5 mm.

A **Figura 71** apresenta a variação da temperatura (ΔT) no fluxo de água, utilizado na refrigeração do anodo, em função da corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. A posição relativa entre os eletrodos foi de $X = 10$ mm e ângulo na extremidade do catodo de 60°.

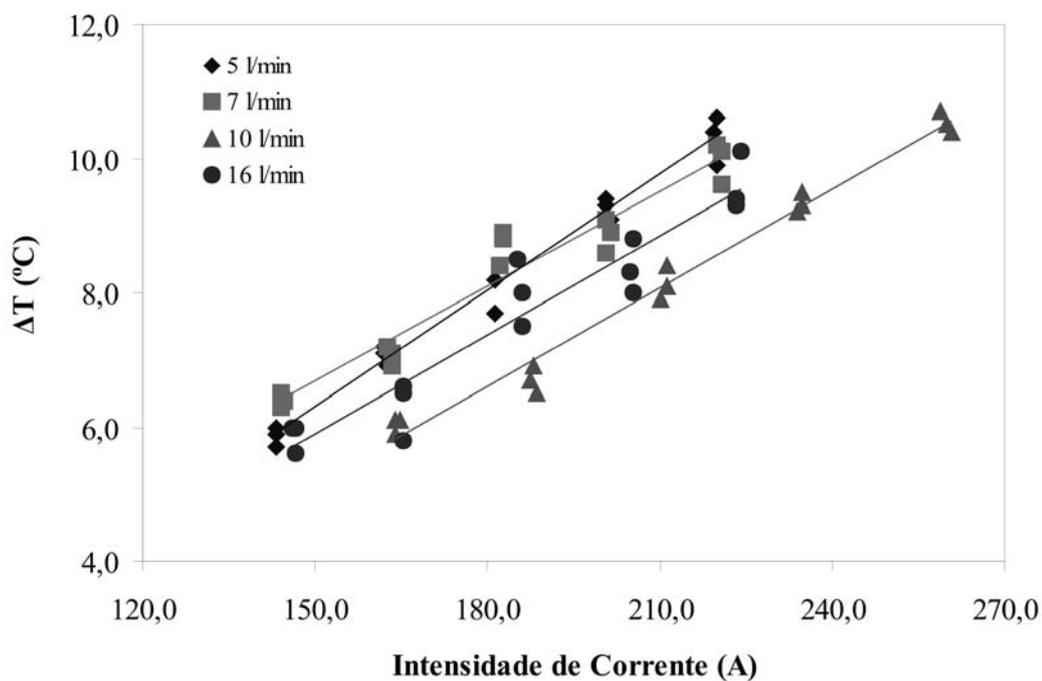


Figura 71. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 60° e posição relativa X entre os eletrodos de 10 mm.

A **Figura 72** apresenta a variação da temperatura (ΔT) no fluxo de água, utilizado na refrigeração do anodo, em função da corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. A posição relativa entre os eletrodos foi de $X = 5$ mm e ângulo na extremidade do catodo de 30°.

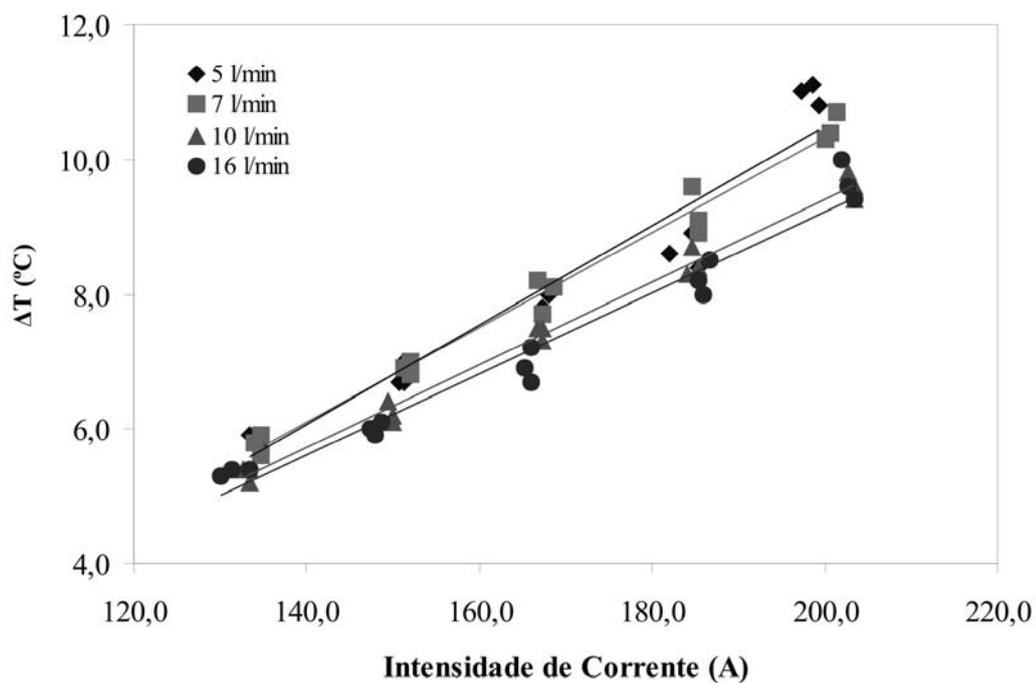


Figura 72. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição relativa X entre os eletrodos de 5 mm.

A **Figura 73** apresenta a variação da temperatura (ΔT) no fluxo de água, utilizado na refrigeração do anodo, em função da corrente elétrica entre os eletrodos para diferentes vazões de gás. A posição relativa entre os eletrodos foi de $X = 10$ mm e ângulo na extremidade do catodo de 30°.

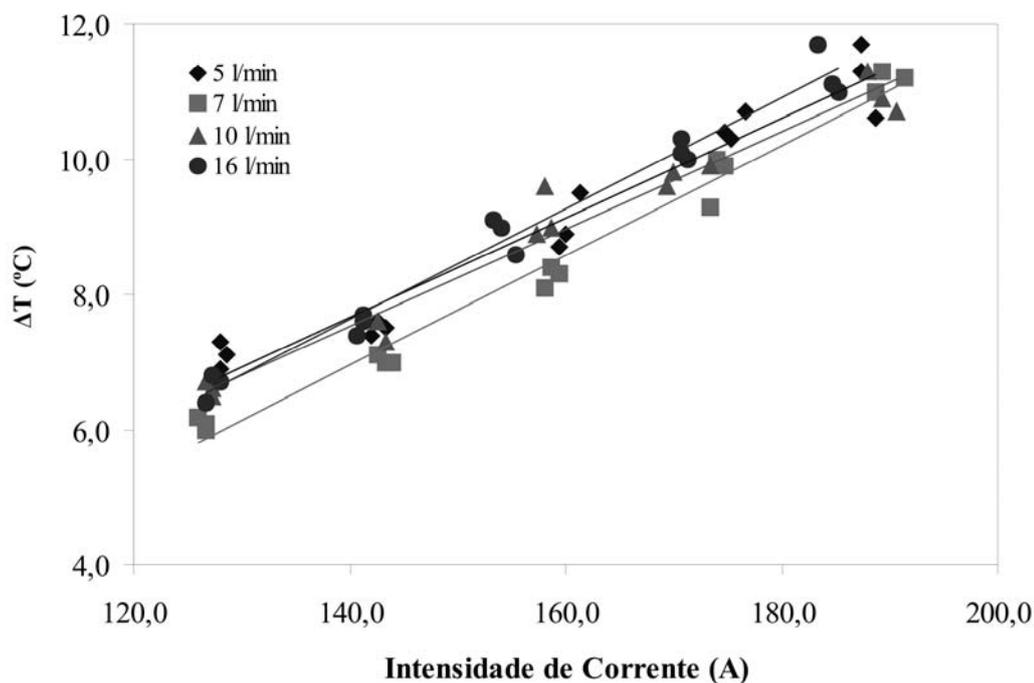


Figura 73. Variação da temperatura no fluxo de água (sistema de refrigeração do anodo) em função da intensidade de corrente elétrica para diferentes vazões de gás. Extremidade cônica do catodo de 30° e posição relativa X entre os eletrodos de 10 mm.

Para todos os experimentos observou-se uma variação média da temperatura no fluxo de água do sistema de refrigeração do anodo de, aproximadamente, $\Delta T_{\text{médio}} \approx 6 \text{ }^\circ\text{C}$, para um intervalo de corrente elétrica de 130 A à 260 A. Porém, pode ser observado que aumentando a vazão do gás as variações de temperaturas diminuem. Desta forma, o aumento do fluxo de gás na câmara do anodo ajuda na refrigeração do mesmo.

Os resultados obtidos com a utilização de um campo magnético externo no dispositivo MPDT-2 são apresentados na **Tabela 2**. A intensidade da força propulsora não sofre variações significativas com a aplicação do campo magnético externo. Entretanto, observou-se que o feixe de plasma expulso para fora da câmara apresentou-se mais colimado com a aplicação do campo magnético externo. Devido a pequena vida útil da bobina, pois aquecia muito, ela não foi utilizada nos processos de soldagem e corte dos materiais.

Tabela 2. Dados experimentais para os testes realizados com campo magnético externo.

Grandezas Físicas	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Intensidade de corrente elétrica (MPDT-2) (A)	150	150	150	170
Intensidade de corrente elétrica (bobina) (A)	5	10	15	5
Campo magnético no centro da bobina (Tesla)	0,007	0,015	0,022	0,007
Massa do fluxo de plasma (g)	4,97	4,91	5,22	5,14
Massa do fluxo de plasma com a bobina (g)	5,21	5,02	5,87	5,48
Força propulsora (sem bobina) (N)	0,049	0,048	0,051	0,050
Força propulsora (com bobina) (N)	0,051	0,049	0,057	0,054
Grandezas Físicas	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8
Intensidade de corrente elétrica (MPDT-2) (A)	170	170	190	190
Intensidade de corrente elétrica (bobina) (A)	10	15	5	15
Campo magnético no centro da bobina (Tesla)	0,015	0,022	0,007	0,022
Massa do fluxo de plasma (g)	5,55	5,58	6,06	6,1
Massa do fluxo de plasma com a bobina (g)	5,75	5,96	5,85	6,05
Força propulsora (sem bobina) (N)	0,054	0,055	0,059	0,060
Força propulsora (com bobina) (N)	0,056	0,058	0,057	0,059

4.2.2 – Aplicação do MPDT-2 em Processos de Soldagem e Corte

Inicialmente, testes de refusão foram realizados em chapas de aço inoxidável para analisar as dimensões do cordão de solda e assim obter os parâmetros de soldagem. Os parâmetros experimentais utilizados para os processos de soldagem autógena são apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3. Dados experimentais dos testes de soldagem utilizando o dispositivo MPDT-2.

Grandezas Físicas	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Gás (proteção) (l/min)	10	10	10
Gás (ionizado) (l/min)	5	5	5
Gás (purga) (l/min)	5	5	5
Distância (bocal x peça) (mm)	5	5	5
Intensidade de Corrente (A)	170	175	180
Diferença de Potencial (V)	17	16,5	16,5
Velocidade de Soldagem (mm/s)	4,2	4,2	6,1
Grandezas Físicas	Teste 4	Teste 5	Teste 6
Gás (proteção) (l/min)	10	10	10
Gás (ionizado) (l/min)	5	5	5
Gás (purgamento) (l/min)	5	5	5
Distância (bocal x peça) (mm)	5	5	5
Intensidade de Corrente (A)	190	195	200
Diferença de Potencial (V)	17,5	17,1	17
Velocidade de Soldagem (mm/s)	6,1	6,1	6,1

Os resultados obtidos para os testes de soldagem com os parâmetros da **Tabela 3** são apresentados nas **Figuras 74 à 79**, as quais mostram as superfícies superiores (1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 e 6.1) e inferiores (1.2, 2.2, 3.2, 4.2, 5.2 e 6.2) da união de chapas com chanfro reto à topo e dimensões 100x50x1,2 mm. Para todos os testes de soldagem foram utilizados extremidade cônica de 60° e posição X entre os eletrodos de 5 mm.

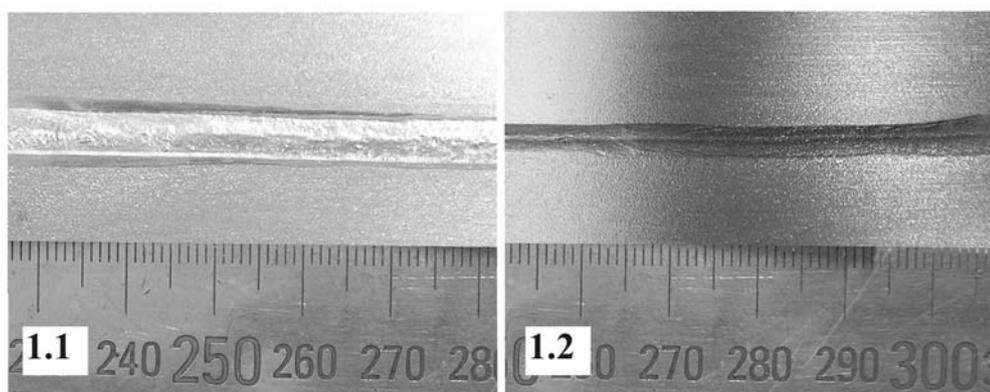


Figura 74. Vista da superfície superior (1.1) e inferior (1.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 1).

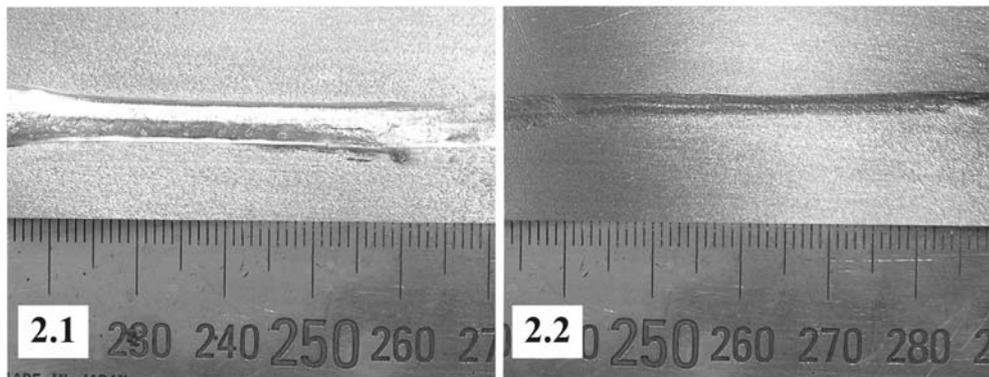


Figura 75. Vista da superfície superior (2.1) e inferior (2.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 2).

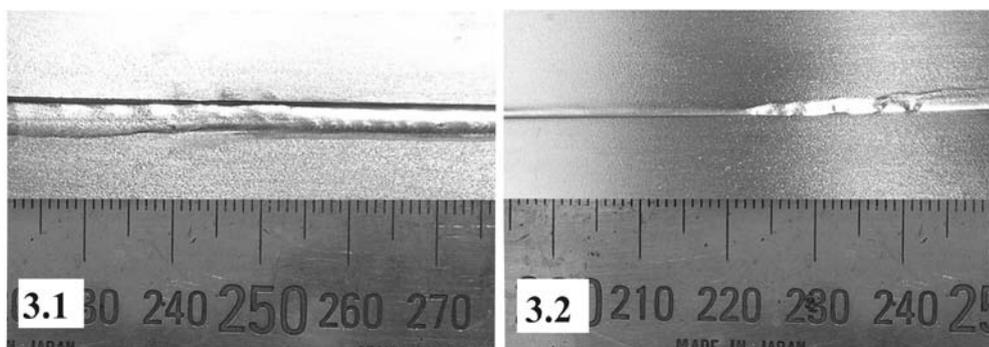


Figura 76. Vista da superfície superior (3.1) e inferior (3.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 3).

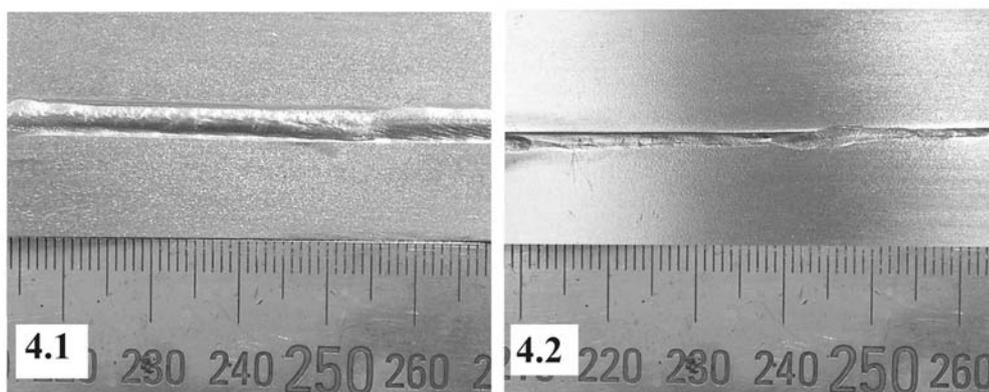


Figura 77. Vista da superfície superior (4.1) e inferior (4.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 4).

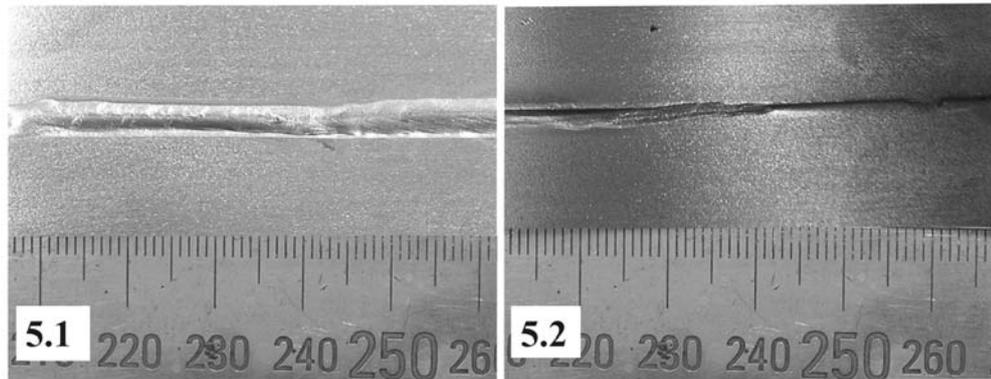


Figura 78. Vista da superfície superior (5.1) e inferior (5.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 5).

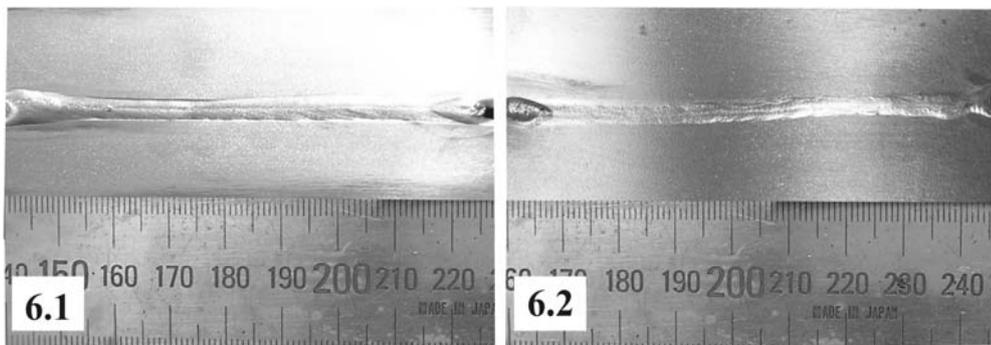


Figura 79. Vista da superfície superior (6.1) e inferior (6.2) das chapas de aço soldadas com os parâmetros apresentados na **Tabela 3** (Teste 6).

A **Figura 80** mostra as macrografias das secções transversais dos cordões de solda obtidos nos testes de soldagem autógena (1, 2, 3, 4, 5 e 6), os quais foram realizados com o dispositivo MPDT-2. Observa-se uma penetração completa para todos os corpos de prova e um perfil mais uniforme para os testes 1, 2, 5 e 6. Os testes 3 e 4 apresentam irregularidade no cordão de solda devido a não centralização das chapas em relação ao feixe de plasma exaustado para fora do dispositivo. Em todos os cordões aparecem pequenas depressões, devido a um possível desvio do feixe de plasma no momento da soldagem. Analisando as macrografias, o cordão de solda que apresenta melhor qualidade é o realizado pelo teste de soldagem “1”.

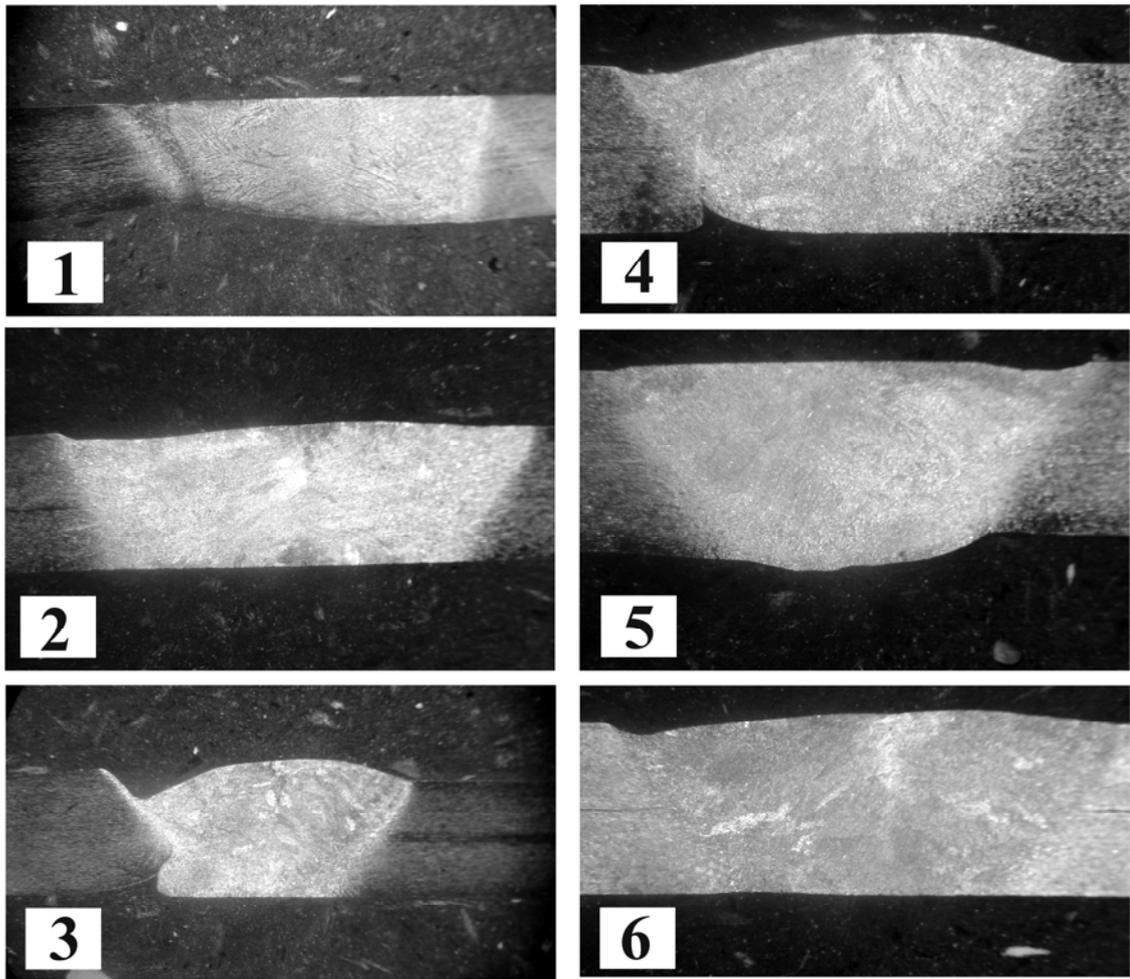


Figura 80. Macrografias das secções transversais dos cordões de solda dos testes 1, 2, 3, 4, 5 e 6 realizados com o dispositivo MPDT-2, onde os parâmetros são apresentados na **Tabela 3**.

A centralização das chapas em relação ao feixe de plasma, o desvio do feixe de plasma e a determinação dos parâmetros de soldagem foram os problemas que dificultaram a realização das soldagens. Apesar das soldagens apresentarem algumas irregularidades, a oxidação diminuiu significativamente e o objetivo foi alcançado, ou seja, o dispositivo magnetoplasmadinâmico pode ser utilizado para soldagem.

Os cortes realizados com o MPDT-2 em chapas com espessura acima de 1 mm foram irregulares, isso devido ao feixe de plasma sofrer pequena inclinação e também pelo fato do feixe não ter força suficiente para expulsar o metal fundido. A **Figura 81** mostra uma secção de uma chapa de aço com espessura de 3,2 mm cortada com o dispositivo. O corte foi realizado com os seguintes parâmetros: intensidade de corrente elétrica de 240 A; vazão do gás de 20 l/min; d.d.p. entre os eletrodos de 20 V; velocidade de corte de 4,2 mm/s; distância

do bocal à peça de 5 mm; extremidade cônica do eletrodos de 60°; e posição X entre os eletrodos de 5 mm.

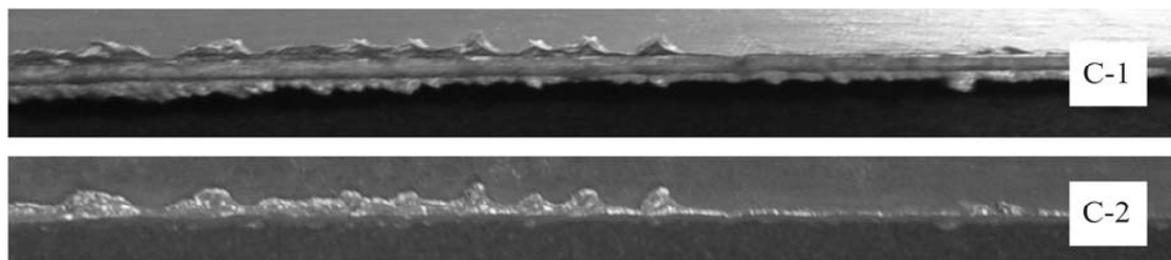


Figura 81. Vista lateral (C-1) e superior (C-2) do corte de uma chapa de aço realizado com o dispositivo MPDT-2.

Salientando, a maior dificuldade para todos os experimentos realizados com os dispositivos MPDT-1 e MPDT-2 foi a centralização do catodo em relação ao anodo. O aquecimento do catodo devido as altas correntes elétricas flexionava e descentralizava o mesmo, ocorrendo a quase extinção do arco e, também, a destruição do catodo através do desgaste em sua extremidade (cônica ou não cônica). Esse desgaste era aparentemente muito pequeno quando o catodo não sofria descentralização.

5 – CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos e as análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Foi desenvolvido e implementado um dispositivo eletromagnético (Propulsor Magnetoplasmadinâmico) para ser aplicado em soldagem e corte.
- O comprimento do feixe de plasma e, conseqüentemente, a propulsão do mesmo para fora da câmara do dispositivo aumenta com o aumento da intensidade de corrente elétrica na maioria dos experimentos realizados com os dispositivos MPDT-1 e MPDT-2.
- Para os dois dispositivos, observou-se que aumentando a vazão do gás dentro da câmara dos mesmos, a diferença de potencial entre os eletrodos também aumenta.
- Nos experimentos realizados com o MPDT-2, em relação às variações na vazão do gás, obteve-se um aumento da força propulsora com o aumento da vazão do gás, existindo algumas exceções, nas quais a força propulsora permaneceu constante com o aumento da vazão do gás.
- Os diferentes ângulos na extremidade cônica do catodo, para a maioria dos experimentos, quase não alterou a força propulsora, isto é, a intensidade da força permaneceu constante, existindo algumas exceções.
- A posição X entre os eletrodos teve, em grande parte dos experimentos, uma influência significativa na força propulsora, ou seja, aumentando o valor de X a força propulsora também aumentava. Nesse caso também houve algumas exceções.
- Nos experimentos realizados com a adição do campo magnético externo não foi constatado aumento significativo na intensidade da força propulsora em função do aumento da intensidade do campo magnético externo, porém, foi constatado que a aplicação de um campo magnético externo torna o feixe de plasma mais colimado.
- Baixas vazões (menores do que 5 l/min) de gás na câmara do dispositivo devem ser utilizadas para realização da soldagem autógena de chapas finas de aço inoxidável, isso porque vazões acima de 5 l/min acabam expulsando o metal fundido tornado o cordão de solda irregular.
- Para a realização de cortes foi constatado que devem-se aplicar vazões de gás acima de 5 l/min.

Além disto, os propulsores eletromagnéticos (MPDTs) podem ser utilizados no desenvolvimento de novas tecnologias em processos de soldagem e corte dos materiais.

6 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestão para futuros trabalhos, os seguintes estudos podem ser realizados:

- Construir dispositivos diferentes com o intuito de estudar o efeito de outras geometrias do anodo no feixe de plasma;
- Estudar os efeitos de diferentes geradores de campo magnético externo (bobinas, imãs, entre outros) anexados ao propulsor magnetoplasmadinâmico;
- Utilizar e otimizar o dispositivo eletromagnético em corte de materiais não metálicos;
- Estudar o desgaste dos eletrodos (anodo e catodo) no dispositivo. Isso em relação às variáveis termodinâmicas (temperatura, calor, etc.);
- Simulações computacionais buscando a otimização do dispositivo em processos de soldagem e corte dos materiais;
- Otimizar a soldagem e ou corte de diferentes materiais realizado com o presente dispositivo, adicionando ou não metal de adição, e comparar com os processos convencionais (plasma, TIG, LASER, entre outros);
- Estudar os efeitos de diferentes gases (H, He, Ni, etc.) no feixe de plasma do MPDT;
- Utilizar o dispositivo eletromagnético em processos de aspersão térmica.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ CHOUËIRI, E.Y. **Overview of U.S. Academic Programs in Electric Propulsion**. 35th AIAA Joint Propulsion Conference, Los Angeles, CA, 21 – 23 June, 1999.
- /2/ JAHN, R. G. **Physics of Electric Propulsion**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- /3/ JAHN, R.G., and CHOUËIRI, E.Y. **Electric Propulsion**. Academic Press Encyclopedia of Physical Science & Technology, Third edition, **5**, 2002.
- /4/ CLARK, K.E. and JAHN, R.G. **The Magnetoplasmadynamic Arcjet**. *Astronautica Acta* – Pergamon Press Ltd. **13**: 315 – 325, 1967.
- /5/ CAP, F.F. **Handbook on Plasma Instabilities**. Academic Press, INC, New York, 1976.
- /6/ BITTENCOURT, J.A. **Fundamentals of Plasma Physics**. Oxford: Pergamon, 1986.
- /7/ MEHTA, R.C., ANDREWS, S. and RAMACHANDRAN, P.V. **Thermal Erosion of Magnetoplasmadynamic Thruster Cathode**. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **39**(8): 1767 – 1769, 1996.
- /8/ MACHADO, I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas – Processos**. Ed. pelo Autor, Distribuído pela Associação Brasileira de Soldagem. Porto Alegre, 1996.
- /9/ CHOUËIRI, E.Y. **A Critical History of Electric Propulsion: The First Fifty Years**. *Journal of Propulsion and Power*, **20**(2): 193 – 203 , March/April, 2004.
- /10/ SHESHADRI, T.S. **Anode Surface Temperature Profile in MPD Thrusters**. *Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology*, **59**: 904 – 909, 2000.
- /11/ SANKARAN, K. **Simulation of Plasma Flows in Self-Field Lorents Force Accelerators**. Tese de Doutorado, Princeton Iniversity, 2005.

- /12/ TILLACK M.S. and MORLEY N.B. **Magnetohydrodynamic**. McGraw Hill Standard Handbook for Electrical Engineers, 14 th edition, 1998.
- /13/ MAECKER, H. **Plasma Jets in Arcs in a Process of Self-Induced Magnetic Compression**. Z. Phys., **141**(1):198–216, 1955.
- /14/ PLONSEY, R. and COLLIN, R.E. **Principles and Applications of Electromagnetic Fields**. McGraw-Hill Book Company, INC, 1961.
- /15/ BURTON, R.L., CLARK, K.E. and JAHN, R.G. **Measured Performance of the Multimegawatt MPD Thruster**. Journal Spacecraft and Rockets, **20**(3): May/June, 1983.
- /16/ TIKHONOV, V. B. and SEMENIHIN, S. A. **Research on Plasma Acceleration Processes in Self-Field and Applied Magnetic Field Thrusters**. 23rd International Electric Propulsion Conference, Seattle, WA, USA, 1993. IEPC-93-076.
- /17/ CHOEIRI, E.Y. **The Scaling of Thrust in Self-Field MPD Thrusters**. Journal Propulsion Power, **14**(5):744–753, 1998.
- /18/ MYERS, R.M. **Geometric Scaling of Applied-Field Magnetoplasmadynamic Thruster**. Journal of Propulsion and Power, **11**(2): March/April, 1995.
- /19/ AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding, Cutting and Related Processes**. Welding Handbook: Section 3B, Sixth Edition, 1971.