



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO GRANDE
INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E FÍSICA - IMEF
FÍSICA BACHARELADO

FRANCIELE DIAS DE CASTRO

**MOVIMENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO NA TOCHA DE
ARCO NÃO TRANSFERIDO**

RIO GRANDE
2019

FRANCIELE DIAS DE CASTRO

**MOVIMENTAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO NA TOCHA DE
ARCO NÃO TRANSFERIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Física Bacharelado, na Universidade Federal de Rio Grande, Câmpus Carreiros, como requisito para obtenção do Título de Bacharela em Física .

Área de concentração: Física Teórica e Experimental

Linha de pesquisa: Física de Plasma

Orientador: Dr. Magno Pinto Collares

RIO GRANDE
2019

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento primeiramente vai para minha mãe Zilda Beatriz e minha avó Mariana Castro que sempre estiveram ao meu lado na jornada pelo conhecimento. A Universidade Federal de Rio Grande, pois pelo fato de ser uma universidade pública e gratuita consegui concretizar um sonho e uma carreira profissional. E, também pela assistência estudantil que me ajudou a permanecer na universidade. Ao meu orientador Magno Collares pelos conhecimentos que me foi passado, pela sua paciência e dedicação. Também agradeço aos meus professores por todos os ensinamentos ao longo do curso. Agradeço ao meu namorado e amigo Luiz Schroeder que sempre me ajudou nos momentos mais tortuosos que passei, principalmente nessa reta final. E aos meus queridos amigos, Lucas Selbach, Lara Gatto, Daniele Mesquita, Daiane Rattamann, Débora Monteiro e Brenda Rolin, pelos divertidos momentos, a todo apoio ao longo dos anos e também, pelo conforto em momentos de angústia.

Resumo

A proposta do trabalho é aprimorar o conhecimento do funcionamento de uma tocha de arco não transferido de corrente contínua, com base no estudo do movimento do arco elétrico. O funcionamento da tocha depende do comprimento do arco que, por sua vez, depende das forças que atuam sobre ele. Inicialmente, foi realizado o estudo detalhado das forças que atuam no arco elétrico. Para o estudo da movimentação do arco foi considerado que a movimentação do arco é unidimensional. Após o estudo, foi feito o equacionamento das forças que atuam no arco. Com o equacionamento das forças e utilizando um software foi possível obter as velocidades do arco, a variação do comprimento em relação à vazão e em relação à variação de corrente. Portanto, fazendo um estudo das equações de movimento e fazendo o estudo numérico, podemos obter os gráficos relacionados às flutuações do comprimento em relação à corrente e à vazão do gás na tocha.

Palavras-chaves: Plasma térmico . Tocha de arco não transferido. Arco elétrico.

ABSTRACT

The purpose of this work is to improve the knowledge of the operation of a non-transferred direct current arc torch, based on the study of electric arc movement. The operation of the torch depends on the length of the arc, which in turn depends on the forces acting on it. Initially, a detailed study of the forces acting on the electric arc was performed. For the study of arc movement it was considered that the arc movement is one-dimensional. After the study, it was made the equation of forces acting on the arc. With the equation of the forces and using software was possible to obtain the arc speeds, the length variation in relation to the flow rate and the change in current. Therefore, making a study of the equations of motion and making the numerical study, we can obtain graphs related to the length fluctuations in relation to the current and the flow of gas in the torch..

Keywords: Thermal plasma, Arc torch not transferred, Electric arc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arco elétrico	1
Figura 2 – Representação da Tocha de Plasma de arco não trasferido	2
Figura 3 – Estabilização por parede e estabilização por vortéx do arco na tocha de plasma	6
Figura 4 – Velocidade na raiz do arco anódico (v_a) e velocidade na junção do arco anódico e catódico (v_j)	7
Figura 5 – Fluxograma das forças que atuam no arco.	8
Figura 6 – Raio de curvatura da coluna do arco anodico e raio da coluna do arco anodico	10
Figura 7 – Caminho da corrente no arco e coordendad cartesiana	11
Figura 8 – Força dF_{La}	13
Figura 9 – Força dF_{wa}	13
Figura 10 – Força dF_{aa}	14
Figura 11 – Força de arrasto na conexão anódica	14
Figura 12 – Balanço de forças total na raiz do arco anódico	14
Figura 13 – Forças na junção da colunas	15
Figura 14 – Balanço total das forças no arco	19
Figura 15 – Gráfico da variação do comprimento para uma corrente de 350 A com variação da vazão de gás	20
Figura 16 – Gráfico da variação do comprimento com uma vazão de $1,6087 \times 10^{-3} kg/s$	21
Figura 17 – Gráfico da variação do comprimento com uma vazão de $2 \times 10^{-3} kg/s$ para corrente 200 A e 600 A	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros controláveis	18
Tabela 2 – Parâmetros não controláveis	18
Tabela 3 – Velocidades	20

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2.3 JUSTIFICATIVA	4
3 – REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 CARACTERÍSTICAS DO FUNCIONAMENTO DA TOCHA	5
3.1.1 CATÓDO	5
3.1.2 ANODO	5
3.1.3 COLUNA DO ARCO	6
3.2 COMPRIMENTO DA COLUNA DE ARCO	7
3.3 FORÇAS PRESENTES EM UM ARCO ELÉTRICO	8
3.3.1 FORÇA DE LORENTZ	8
3.3.2 FORÇA DE IMPULSO PROVOCADA PELA ASSIMETRIA MAGNÉTICA	10
3.3.3 FORÇA GERADA PELA CORRENTE NO MATERIAL	11
3.3.4 FORÇA DE ARRASTO	12
3.4 BALANÇO DAS FORÇAS NO ARCO	12
3.4.1 RAIZ DO ARCO ANÓDICO	12
3.4.2 A JUNÇÃO DAS COLUNAS DOS ARCOS ANÓDICO E CATÓ- DICO	15
4 – CÁLCULO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DA COLUNA DE ARCO	16
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
6 – CONCLUSÃO	22
Referências	23

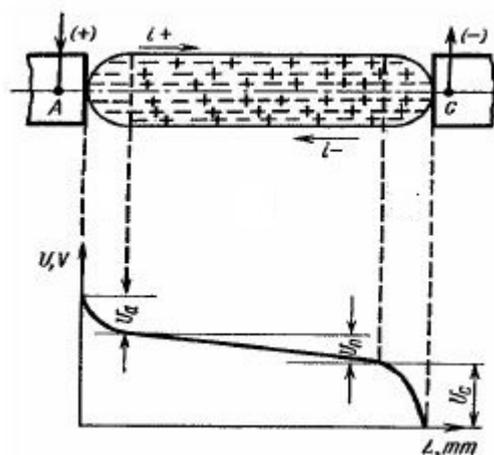
1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o plasma tem despertado interesse por promover a geração de ambientes altamente reativos por meio de sistemas de geração de plasmas térmicos e não térmicos. O plasma térmico é caracterizado por ter equilíbrio térmico entre seus componentes devido à alta taxa de colisão, destacam-se, por exemplo, descargas atmosféricas e de plasmas gerados de tochas de plasma de arco transferido e não transferido. O plasma não térmico é caracterizado por não ter equilíbrio térmico entre seus componentes devido à baixa taxa de colisão entre seus componentes, destacam-se as descargas em arcos elétricos deslizantes e as descargas de baixa pressão.

As tochas de plasma podem ser classificadas de duas formas: tochas de arco não transferido e as tochas de arco transferido. Nas tochas de arco transferido, o anodo, geralmente aterrado é posicionado externamente à tocha de plasma. Em tochas de arco não transferido, o cátodo e anodo são posicionados dentro da tocha. O arco elétrico é mantido confinado no interior da tocha, sendo que o material processado terá contato somente com o jato ou chama de plasma (GASPERI et al., 2008).

A tocha utilizada no estudo é uma tocha de arco não transferido de corrente elétrica contínua. No interior da tocha o circuito elétrico é fechado entre os eletrodos, o cátodo e o anodo, por meio da geração de um arco elétrico.

Figura 1 – Arco elétrico



Fonte: (ANGELES; JENNER et al., 2003)

No arco elétrico, como mostra a figura 1, a queda de tensão pode ser dividida em três principais regiões chamadas de região do cátodo, coluna de arco e região do anodo (COLLARES, 1996). Nas regiões próximas aos eletrodos há uma concentração de portadores de carga (íons positivos próximos do cátodo) e elétrons (elétrons próximos do anodo) que, como consequência, geram um campo elétrico de maior intensidade devido à interação das cargas. Nesses tipos de sistemas é esperado uma relação entre a voltagem e

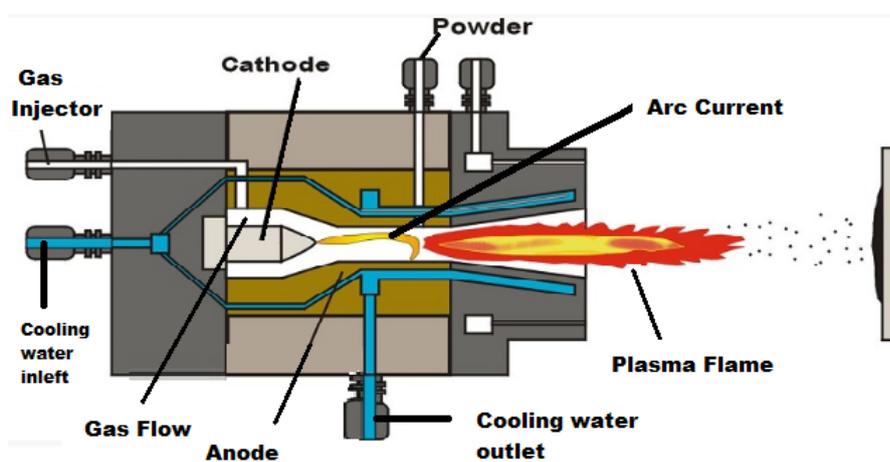
corrente. Portanto, é esperado que a tensão no arco V_{arc} seja uma função da corrente I . Isso pode ser representado pela fórmula: (COLLARES, 1996):

$$V_{arc} = f(I)$$

Como todo equipamento, a tocha de plasma é constituída por elementos básicos, que são (figura 2):

1. eletrodos: anodo (bocal anódico) e cátodo;
2. canal de entrada da água de refrigeração e conexão do cabo negativo;
3. canal de gás injetor;
4. canal de saída da água de refrigeração e conexão do cabo positivo.

Figura 2 – Representação da Tocha de Plasma de arco não trasferido



Fonte:(PLASMA, 2019)

A tocha de plasma funciona ligada a uma fonte de corrente contínua que é responsável por gerar e manter o arco dentro da tocha. Tipicamente em processos, é usada uma corrente entre 100 e 500 A e tensão entre 20 V e 100 V. A eficiência de conversão de energia elétrica em energia térmica da tocha está na faixa de potência, tipicamente em torno de 50% e 60%. A eficiência é obtida pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_e - Q_p}{P_e} \quad (1)$$

onde

$$P_e = V_e I \quad (2)$$

$$Q_p = C_p \dot{m} \Delta T \quad (3)$$

sendo Q_p é a taxa de calor perdida para a água de refrigeração, C_p é o calor específico da água de refrigeração da tocha, \dot{m} é a taxa da vazão da água de refrigeração, ΔT é

variação de temperatura da água de refrigeração, P_e é a potência da tocha, I é a corrente elétrica e V_e é a voltagem efetiva.

O objetivo a ser estudado no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso é investigar sobre o movimento do arco em tochas de plasmas de arco não transferido. A investigação sobre o comportamento do arco é abordado nos capítulos seguintes. O estudo parte da abordagem das forças que atuam no arco e finaliza com o resultado do equacionamento das forças.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é investigar a dinâmica de flutuação do arco em uma tocha de plasma térmico de arco não transferido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De acordo com o objetivo principal, os objetivos específicos deste trabalho são:

1. estudar as forças que atuam no arco;
2. avaliar o comportamento do arco elétrico fundamentado nas equações de movimento.
3. relacionar o comportamento do arco com a corrente e vazão do gás.

2.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente, as tochas de plasma são utilizadas para diversas aplicações como, corte a plasma, plasma spray (deposição de cerâmica e metais protetores), pirólise (inertização de produtos químicos), destruição de lixo hospitalar, esferoidização (processo de formação esferas por meio do aquecimento de pó), na recuperação de metais de fins metalúrgicos e entre outros (ANGELES; JENNER et al., 2003). Portanto, o estudo da movimentação do arco é relevante para o entendimento e controle da operação das tochas de arco não transferido. Conhecendo melhor a movimentação do arco na tocha é possível evitar o desgaste dos eletrodos e também aprimorar processos industriais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este estudo do comportamento e dinâmica do arco em tochas de arco não transferido está fundamentado na variação do comprimento do arco e nas forças que agem sobre ele, interferindo no seu comportamento ¹.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO FUNCIONAMENTO DA TOCHA

3.1.1 CATÓDO

O cátodo é utilizado para fornecer elétrons que são responsáveis por manter o fluxo de corrente elétrica no plasma. Em arcos elétricos existem duas maneiras principais em que é possível liberar os elétrons do material catódico, que são: a emissão termiônica e a emissão por campo. A emissão termiônica acontece quando a temperatura de um material aumenta facilitando a ejeção de elétrons do material, ou seja, é usada a energia térmica para liberar os elétrons da superfície do material. Materiais típicos em que a emissão termiônica pode ser obtida são o tungstênio, háfnio, zircônia. A densidade de corrente para esse processo é 10^7 A/m² a 10^8 A/m² e a corrente é 1 A a 10 kA. (COLLARES, 1996)

A emissão por campo ocorre quando um material é submetido a um campo elétrico que provoca a redução da barreira de potencial dos elétrons no material (função trabalho), sendo mais fácil de retirá-los. Esse processo é mais comum em materiais de baixo ponto de fusão. As densidades de corrente para esse processo são de 10^{10} a 10^{12} A/m² e a corrente é de 0,05 a 2 kA. (COLLARES, 1996).

3.1.2 ANODO

O anodo tem a função de coletar os elétrons da coluna de arco para fechar o circuito elétrico. Entre o anodo e a coluna de arco há duas regiões. Em uma região os elétrons e átomos neutros se colidem e formam íons. Na outra região, os elétrons são acelerados pelo potencial elétrico em direção a superfície do anodo. Portanto, os elétrons são acelerados em direção a superfície anódica e transferem sua energia para o material.

A potência transferida para o anodo não depende somente dos elétrons, o comprimento do arco também contribui. O calor que é transferido para o ânodo pode ser combinado com as energias térmica (cinética), os fluxos de calor por condução, condensação, convecção e radiação.

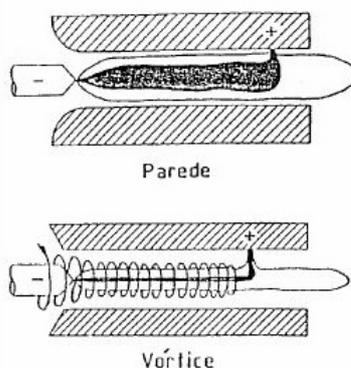
¹O referencial teórico foi baseado na tese CHARACTERISTICS OF DC PLASMA TORCHES AND THE USE OF MAGNETIC PROBES FOR DIAGNOSTICS por Magno Pinto Collares.

3.1.3 COLUNA DO ARCO

Uma coluna de arco é caracterizada por ter uma densidade de partículas negativas aproximadamente igual à densidade de partículas positivas e um pequeno gradiente de potencial elétrico, ou seja, uma coluna de plasma. Na coluna de plasma os elétrons são termalizados adquirindo uma energia média associada ao movimento aleatório dos elétrons. Para manter o equilíbrio de portadores de carga no arco é necessário um balanço entre os processos de produção e perda de portadores de carga. Essa produção acontece pelo processo de ionização em plasma, mantida pelos elétrons com alta energia. Além disso, tem-se também as perdas por processos de difusão para as paredes devido a geração de um campo elétrico radial de polarização.

Um arco torna-se estabilizado quando a coluna fica em uma posição fixa ou move-se por um caminho conhecido. Há duas maneiras de estabilizar a coluna de arco na tocha de plasma, e são: estabilização utilizando a parede da tocha e estabilização por transferência de calor convectiva. Na estabilização por parede, como mostra a figura 3, a coluna de arco passa pelo canal ou bocal empurrado pelo gás de trabalho. Ao passar pelo canal, o gás de trabalho é aquecido e ionizado gerando o jato de plasma que sai da tocha.

Figura 3 – Estabilização por parede e estabilização por vórtice do arco na tocha de plasma



Fonte: (ANGELES; JENNER et al., 2003)

A estabilização da coluna de arco pela transferência de calor convectiva, como demonstrado na figura 3 ocorre ao injetar uma vazão de gás em vórtice. Essa vazão de gás gera uma força direcionando o gás para a parede do bocal. A coluna do arco, devido a rotação, fica confinada no centro do vórtice do gás de trabalho.

Entre a coluna do arco e o bocal há uma queda de tensão V_g que depende do comprimento do arco, do gás e da pressão. A relação entre a tensão e o comprimento do arco é diretamente proporcional, pois ao aumentar o comprimento do arco, a tensão V_g também aumenta até $V_g \geq U_b$ onde U_b é o potencial de ruptura de um novo arco. A ruptura de um novo arco acontece perto do cátodo. Ao manter o fluxo de gás, o arco é empurrado para fora da tocha até que aconteça uma ruptura de um novo arco. Portanto, quando o potencial de ruptura é menor que o potencial V_g acontece o restrike.

3.2 COMPRIMENTO DA COLUNA DE ARCO

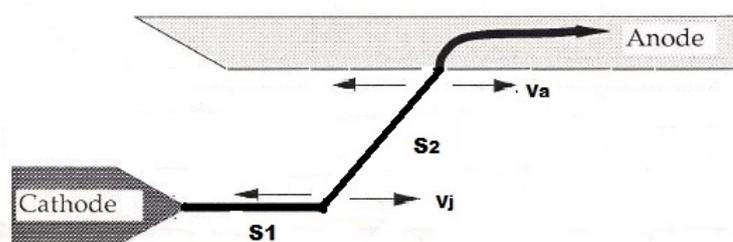
O comprimento da coluna de arco na tocha pode ser definido pela soma da distância da ponta do cátodo (chamado de coluna catódica) até a junção da coluna de arco catódica com a coluna de arco anódica, mais a coluna de arco anódica. A análise do comprimento do arco é feita somente em uma dimensão (Como as forças que agem sobre o arco, que será abordado no próximo tópico, também serão analisadas em uma dimensão).

A equação para o comprimento do arco é linear e em função do tempo. Uma equação que é geral para comprimento linear em função do tempo é

$$S = s_0 + v_0 t \quad (4)$$

onde S é o comprimento em função do tempo, S_0 é o comprimento inicial e v_0 é a taxa variação do comprimento com o tempo.

Figura 4 – Velocidade na raiz do arco anódico (v_a) e velocidade na junção do arco anódico e catódico (v_j)



Fonte: (COLLARES, 1996)

O comprimento total do arco é dado pelos segmentos de arco elétrico S_1 e S_2 , (ver na figura 4):

$$L(t) = S_1(t) + S_2(t) \quad (5)$$

onde S_1 é o comprimento da coluna catódica até a junção e S_2 é o comprimento da coluna do ânodo até a junção. Portanto, o comprimento S_1 e S_2 são dadas por

$$S_1 = S_{1,0} + v_j t \quad (6)$$

$$S_2 = \sqrt{S_{2,0}^2 + (v_j - v_a)^2 t^2} \quad (7)$$

O comprimento S_2 é definido dessa forma devido a geometria do sistema, conforme mostrada na figura 4. Nas equações, $S_{1,0}$ e $S_{2,0}$ são os comprimentos iniciais das colunas de arco do cátodo e do ânodo, respectivamente.

Dessa forma, podemos escrever a equação do movimento para seguinte forma

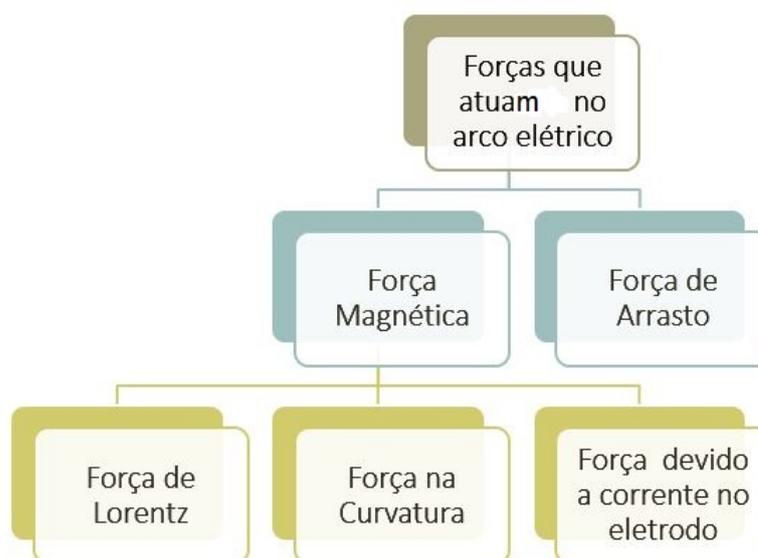
$$L(t) = \sqrt{(v_j - v_a)^2 t^2 + y_0^2} + v_j t + z_0 + c \quad (8)$$

Onde c é a curvatura do arco na junção, que é uma constante da ordem do raio da coluna do arco anódico e catódico, v_j é a velocidade da junção do arco anódico e catódico, v_a é a velocidade da raiz anódica e y_0 e z_0 são os comprimentos iniciais das colunas dos arcos anódico e catódico, respectivamente.

3.3 FORÇAS PRESENTES EM UM ARCO ELÉTRICO

As forças que atuam no arco são duas: a força de arrasto e a força magnética. No entanto, a força magnética é dividida em três maneiras de acordo com a geometria de cada parte do arco. O fluxograma abaixo mostra como as forças são organizadas.

Figura 5 – Fluxograma das forças que atuam no arco.



Fonte: a autora

Nesta seção será descrita cada uma das forças presentes no arco em tochas de arcos não transferidos com um confinamento forçado pelo bocal do ânodo e em regime de "Restrike".

3.3.1 FORÇA DE LORENTZ

A força magnética sobre uma partícula é dado por

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (9)$$

No caso do arco elétrico, é possível fazer a seguinte aproximação: considerar o arco elétrico como um fio. Partindo disso, é obtida a força total sobre todas as partículas que estão se movendo ao longo de um comprimento. Portanto, é necessário representar o segmento do fio por um vetor \vec{y} ao longo do fio e com o mesmo sentido da corrente. Então, a força \vec{F} que atua no segmento é a força magnética sobre um segmento de fio retilíneo

que é dada por

$$\vec{F} = I\vec{y} \times \vec{B} \quad (10)$$

Onde I é a corrente no arco e \vec{B} é o campo de indução gerado pela corrente I .

Para o condutor não retilíneo, que é o caso do arco elétrico, podemos dividi-lo em segmentos infinitesimais $d\vec{y}$, sendo dy o segmento do canal de corrente. Portanto, a força dF sobre cada segmento é

$$d\vec{F}_L = \vec{I} \times \vec{B} dy \quad (11)$$

Onde I é a corrente total no canal de descarga e B é o campo de indução magnética.

Considerando o módulo da força de Lorentz, temos

$$dF_L = I B_0 dy \quad (12)$$

Utilizando a aproximação da equação de B para um condutor longo e retilíneo, temos

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi y} \quad (13)$$

No caso da tocha, pode-se ter um campo que é gerado pela corrente na coluna de arco e outro devido à corrente no material. A equação 13 corresponde ao campo que não é gerado pela corrente no material. Nesse caso a força fica

$$dF_L = \frac{\mu_0 I^2}{2 \pi y_c} dy \quad (14)$$

Onde I é a corrente elétrica total na coluna de arco e y_c é a distância vertical do eixo do bocal à raiz anódica.

No caso em que a corrente no material gera um campo, é necessário incluir um fator de distribuição de corrente em torno do material β ($0 < \beta < 1$), sendo 0 quando a corrente está totalmente distribuída no material e 1 quando a corrente está concentrada em um ponto do bocal, especificamente na raiz do arco anódico. Portanto, a equação 13 incluindo β fica

$$B = \frac{\mu_0 \beta I}{2 \pi y} \quad (15)$$

Para esse caso, a força é

$$dF_L = \frac{\mu_0 \beta I^2}{2 \pi y} dy \quad (16)$$

onde I é a corrente elétrica total na coluna de arco.

3.3.2 FORÇA DE IMPULSO PROVOCADA PELA ASSIMETRIA MAGNÉTICA

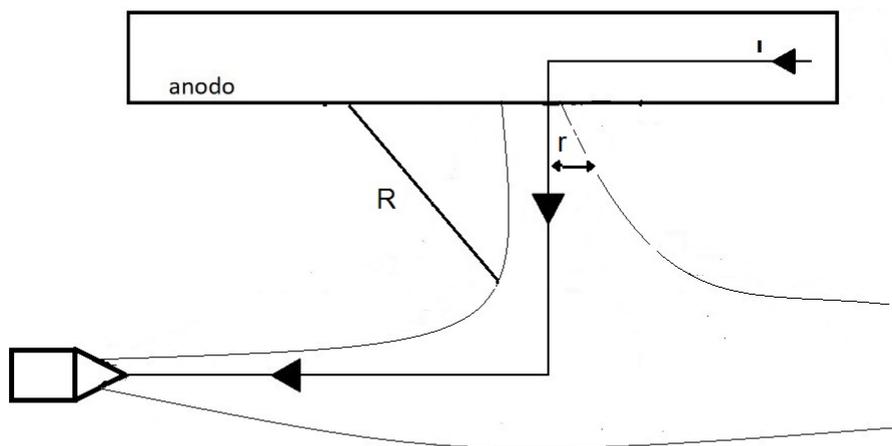
Na coluna de arco do anodo e na coluna arco do cátodo, há uma força de impulso que age na coluna de arco na direção oposta do plasma que é ejetado. Essa força acontece devido a curvatura da coluna do arco. O campo magnético na curvatura não é simétrico, pois há diferença de concentração de campo na curvatura e a assimetria do campo magnético provoca uma pressão eletromagnética na coluna do arco. O plasma que está no canal de descarga se direciona na direção em que há menor pressão, então o plasma acaba sendo bombeado magneticamente e deixa o canal de descarga em forma de um jato de plasma (COLLARES; PFENDER, 1997) .

Desse modo, o jato de plasma que está na coluna do arco vai se direcionar para parte com menor pressão magnética criando um impulso que atua na direção da região interior da tocha se opondo a força magnética. (COLLARES; PFENDER, 1997).

Para calcular a força de impulso do gás sobre a região da junção das colunas anódicas e catódicas, Collares e Pfender em seu artigo (COLLARES; PFENDER, 1997), assumiram que a força de impulso é diretamente proporcional ao desequilíbrio da pressão eletromagnética ao redor do segmento do canal de descarga. Na ausência de um campo magnético externo, temos a seguinte equação

$$dF_w = -\frac{3\mu_0 I^2}{16\pi R} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] dy \quad (17)$$

Figura 6 – Raio de curvatura da coluna do arco anodico e raio da coluna do arco anodico



Fonte: a autora

onde μ_0 é a permeabilidade magnética, R é o raio de curvatura da coluna do arco anódico, r é o raio da coluna do arco anódico e dy é o elemento de comprimento da coluna do arco anódico.

3.3.3 FORÇA GERADA PELA CORRENTE NO MATERIAL

A equação 17, deduzida por Wutzke, não considera a força que está agindo na coluna de arco anódica devido a corrente no bocal anódico próximo da raiz do arco anódico. No entanto, Collares em seu artigo, calcula essa força. A dedução dessa força é feito no Anexo conforme as descrições abaixo.

A densidade de corrente não é distribuída uniformemente na vizinhança de conexão da coluna do arco anódico com o material do bocal. Portanto, o que é importante nesta análise é a densidade de fluxo de momento, com isso, é usado o tensor de Maxwell:

$$T_{ij} = \epsilon_0 \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad (18)$$

onde E é campo elétrico e B é a indução magnética.

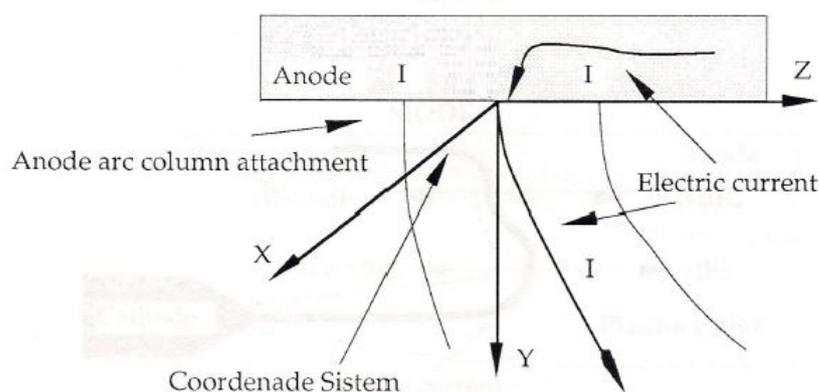
O elemento de superfície da força para uma componente i , pode ser escrita em termos do tensor de Maxwell. A forma do elemento de força é dada por (GRIFFITHS, 2011)

$$d\vec{F}_i = \sum_{i=x,y,z} T_{ij} dS_i \quad (19)$$

onde dS_i é a área da superfície na direção do movimento do arco e dF_i é o elemento de força na direção do movimento.

O cálculo é feito na componente k desta força, já que o arco está sendo empurrado para a direção z como demonstrado na figura 7. Portanto, $d\vec{S}_z = n_z dS$ onde n_z é o vetor unitário na direção z (COLLARES, 1996). Então, o elemento de força é $d\vec{F}_z = T_{zz} n_z dS$.

Figura 7 – Caminho da corrente no arco e coordenação cartesiana



Fonte: (COLLARES; PFENDER, 1997)

Nas direções y e x os campos elétricos são simétricos, logo serão nulos. Devido a curvatura do arco, a indução magnética nesse ponto não é simétrica, e por isso há uma pressão magnética nesse ponto. Portanto, se a componente z do campo elétrico for zero

temos somente a componente da indução magnética do tensor de Maxwell, então temos

$$dF_z = -\frac{1}{2\mu_0} B^2 dS \quad (20)$$

Substituindo a equação 15 em dF_z , temos

$$dF_z = -\frac{1}{2} \frac{\beta^2 \mu_0 I^2}{(2\pi y)^2} dS \quad (21)$$

onde I é a corrente no material do bocal anódico na vizinhança da raiz do arco anódico e β representa a distribuição de corrente em torno no material ($0 < \beta < 1$).

A área na qual a força do campo magnético atua a secção reta do arco que é dada por $dS = D_x dy$ onde $D_x = 2r_x$ é o diâmetro da coluna de arco anódico transversal, então

$$dF_z = -\frac{\mu_0 \beta^2 I^2 D_x}{8\pi^2 y^2} dy \quad (22)$$

Essa expressão é responsável pela contribuição da corrente no material do bocal anódico ou na coluna de arco catódico. Isso para a força exercida na raiz da coluna de arco anódico ou na junção da coluna de arco catódico e anódico.

3.3.4 FORÇA DE ARRASTO

A força de arrasto na dinâmica do fluidos é definida como a resistência do movimento de um objeto por meio de um fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). As forças de fricção agem na direção paralela à superfície do objeto, e as forças de pressão atuam na direção perpendicular à superfície. Na situação da tocha, no bocal anódico, o fluxo de gás cria uma força na coluna de arco. Essa força de arrasto é dada por

$$dF_D = C_D r \rho (U_g - v_{arc})^2 dy \quad (23)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto, r é o raio da coluna do arco anódico, ρ é densidade de gás frio, U_g é a velocidade e dy é elemento do comprimento da coluna do arco anódico, v_{arc} velocidade da coluna de arco.

3.4 BALANÇO DAS FORÇAS NO ARCO

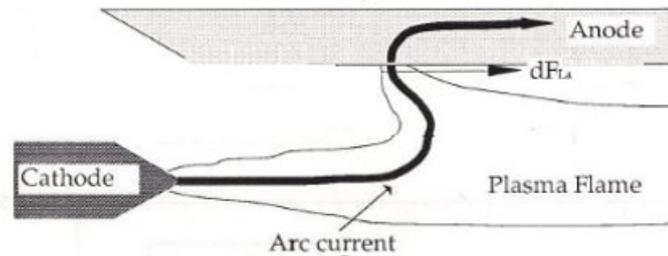
3.4.1 RAIZ DO ARCO ANÓDICO

Devido a corrente que passa na coluna de arco catódico, um campo magnético é gerado. Com isso, é possível identificar uma força que age na raiz do arco anódico que é a força de Lorentz. A força de Lorentz é dada por

$$dF_{La} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi y_c} dy \quad (24)$$

onde I é a corrente elétrica total na coluna de arco e y_c é a distância vertical do eixo do bocal anódico a raiz do arco anódico. Essa força na direção positiva de Z tende a empurrar a raiz do arco anódico para o exterior da tocha.

Figura 8 – Força dF_{La}



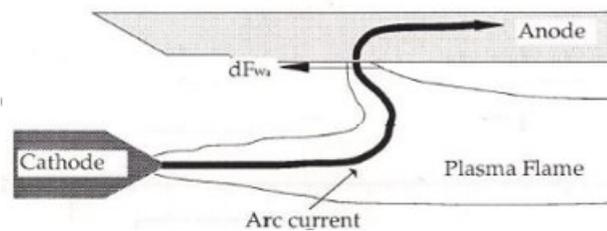
Fonte: (COLLARES, 1996)

A segunda força se dá pela curvatura da coluna anódica descrita pela equação abaixo

$$dF_{wa} = -\frac{3\mu_0 I^2}{16\pi R} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (17)$$

Essa equação está relacionada com assimetria do campo magnético devido a curvatura da coluna do arco.

Figura 9 – Força dF_{wa}



Fonte: (COLLARES, 1996)

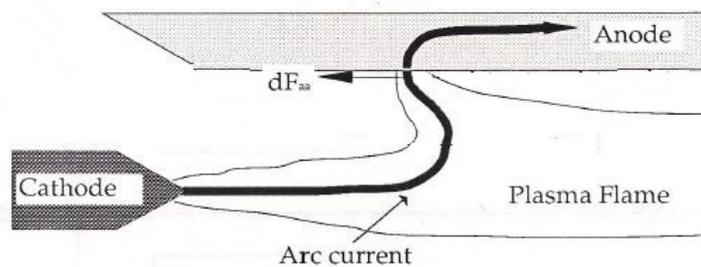
A terceira força é devido a corrente no material do bocal anódico na vizinhança da raiz do arco. Essa força tende a reduzir a força de Lorentz e pode ser calculado por

$$dF_{aa} = -\frac{\mu_0 \beta^2 I^2 D_x}{8\pi^2 y^2} dy \quad (??)$$

A quarta força é devido a vazão de gás dentro do bocal anódico. Assumindo que não há deslizamento do gás na parede do bocal, então não há força de arrasto na raiz do arco da parede. A raiz do arco se moverá criando uma velocidade relativa em torno do gás. Então, terá uma força de arrasto devido esse movimento relativo. A expressão geral da força de arrasto é

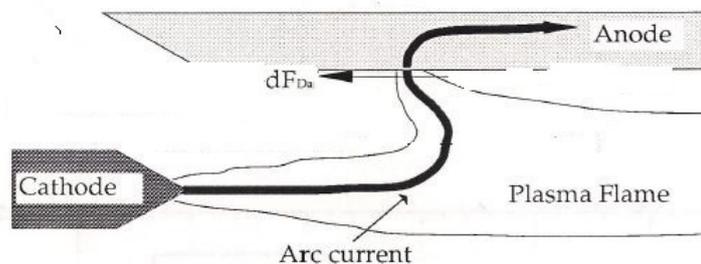
$$dF_{Da} = C_{Dr} \rho v_a^2 dy \quad (23)$$

Figura 10 – Força dF_{aa}



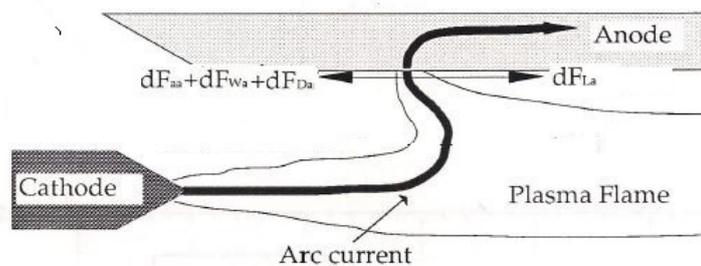
Fonte: (COLLARES, 1996)

Figura 11 – Força de arrasto na conexão anódica



Fonte: (COLLARES, 1996)

Figura 12 – Balanço de forças total na raiz do arco anódico



Fonte: (COLLARES; PFENDER, 1997.)

Com todas as equações mencionadas acima, é possível, fazer o balanço de forças que agem no arco elétrico. Os sinais que aparecem no balanço das forças indica sentido de cada forças na raiz do arco. O balanço das forças pode ser descrito como

$$dF_{La} - dF_{Wa} - dF_{aa} = dF_{Da} \quad (25)$$

onde dF_{La} é a força de Lorentz na raiz do arco anódico devido a coluna catódica, dF_{Wa} é da força magnética no arco anódico de conexão devido a curvatura da coluna na raiz do arco anódico, dF_{aa} é a força magnética no arco anódico devido a corrente no material do eletrodo (ânodo) e dF_{Da} é a força de arrasto.

3.4.2 A JUNÇÃO DAS COLUNAS DOS ARCOS ANÓDICO E CATÓDICO

Para a região onde a coluna de arco anódico junta-se à coluna de arco catódico, a curvatura na junção das duas colunas cria desequilíbrio da pressão eletromagnética dentro do canal de descarga. Esse desequilíbrio de pressão dentro do canal de descarga do arco provoca um bombeamento de gás de plasma em direção a parte exterior da tocha. O plasma ejetado do canal de descarga equivale a uma propulsão na coluna de arco em direção à parte interior da tocha, por conservação de momento. A propulsão é dada pela soma das equações 17 e 22 (COLLARES; PFENDER, 1997).

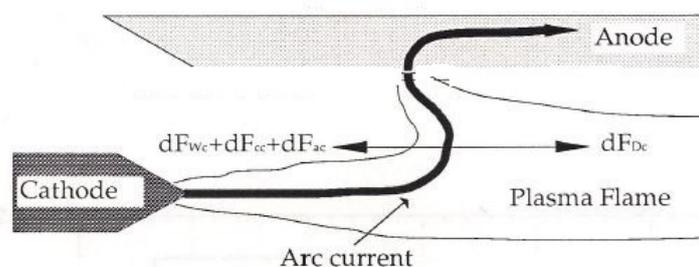
Collares em sua tese considerou a interação do campo magnético produzido pela corrente no material do bocal anódico na junção da coluna de arco catódica com a coluna de arco anódica (COLLARES, 1996). Portanto, Collares percebeu essa interação e então, inclui a propulsão, como comentado no parágrafo anterior propondo um outro modelo para a movimentação do arco no interior da tocha.

A força de arrasto sempre irá empurrar a junção para a parte exterior da tocha, tal força pode ser expressa pela equação 23.

Portanto, o balanço de força é dado por

$$dF_{Wc} + dF_{cc} + dF_{ac} = dF_{Dc} \quad (26)$$

Figura 13 – Forças na junção da colunas



Fonte: (COLLARES, 1996)

onde dF_{wc} é força magnética devido a curvatura do canal de descarga na junção é expressa por 17, dF_{cc} é força magnética na junção devido à corrente da coluna de arco catódico expressa por 14, dF_{Dc} é a força de arrasto na junção expressa por 23, dF_{ac} é a força de Lorentz devido ao campo magnético gerado pela corrente no material do bocal expressa pela equação 16. Dessa forma, é obtido os balanços de forças para região da junção.

4 CÁLCULO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DA COLUMA DE ARCO

Para determinar a variação do arco é necessário determinar a velocidade no arco anódico, a velocidade na junção e os comprimentos iniciais das colunas dos arcos anódico e catódico.

A equação do comprimento é dada por

$$L(t) = \sqrt{(v_j - v_a)^2 t^2 + y_0^2} + v_j t + z_0 + c \quad (27)$$

A variação do comprimento do arco é dado por:

$$\begin{aligned} \Delta L(t) &= L(t) - L(0) \\ \Delta L(t) &= \sqrt{(v_j - v_a)^2 t^2 + y_0^2} + v_j t + z_0 + c - (\sqrt{y_0^2} + z_0 + c) \end{aligned}$$

Portanto,

$$\Delta L(t) = \sqrt{(v_j - v_a)^2 t^2 + y_0^2} - y_0 + v_j t \quad (28)$$

Para encontrar a velocidade do arco anódico e a velocidade na junção é preciso fazer o cálculo do balanço das forças. O arco anódico ao se movimentar faz um ângulo θ que depende da velocidade v_a e v_j . Quando $v_a = v_j$ temos $\theta = 0$, $v_a > v_j$ temos $\theta > 0$ e $v_a < v_j$ temos $\theta < 0$. Portanto, para determinar o ângulo, é considerado a seguinte equação

$$\theta(t) = \arctan \left[\frac{(v_j - v_a)t}{y_m} \right] \quad (29)$$

Primeiramente, o balanço de forças na raiz de arco fica

$$dF_{La} - dF_{Wa} - dF_{aa} = dF_{Da} \quad (30)$$

$$\frac{\mu_0 I^2}{2\pi y_c} dy - \frac{3\mu_0 I^2}{16\pi R} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] dy - \frac{\mu_0 \beta^2 I^2 D_{x_a}}{8\pi^2 y_a^2} dy = C_{Dr} \rho_a (v_a)^2 dy \quad (31)$$

onde y_c é a distância do eixo do bocal anódico até junção, y_a é a espessura do bocal anódico, r é o raio de arco coluna anódico, R é o raio de curvatura da coluna de arco anódico, D_{x_a} é o diâmetro transversal da coluna do arco anódico e C_d é o coeficiente de arrasto.

Para a junção

$$dF_{Wc} + dF_{cc} + dF_{ac} = dF_{Dc} \quad (32)$$

$$-\frac{3\mu_0 I^2}{16\pi R} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] dy + \frac{\mu_0 I^2 \beta}{2\pi y_{ac}} dy + \frac{\mu_0 \beta^2 I^2 D_{x_c}}{8\pi^2 r_j^2} dy = C_{Dr} \rho_c (U_g - v_j)^2 dy \quad (33)$$

onde r_c é o raio da coluna de arco catódico até a junção, D_{x_c} é o diâmetro da coluna de arco anódico na junção, U_g é a velocidade do gás sendo dada do por

$$U_g = \dot{m}_t / \bar{\rho} A$$

onde \dot{m}_t é a vazão total do gás, $\bar{\rho}$ é a densidade média do gás e A é a área da secção transversal do bocal anódico. Nas equações 39 e 37, é possível fazer uma modificação. Reescrevendo R como $R \approx \frac{ym}{\sin\theta}$ e substituindo nas equações de balanço das forças, temos para a raiz de arco

$$dF_{L_a} - dF_{W_a} - dF_{a_a} = dD_a$$

$$\frac{\mu_0 I^2}{2\pi y_c} dy - \frac{3\mu_0 I^2 \sin\theta}{16\pi ym} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r \sin\theta}{ym} \right)^2 \right] dy - \frac{\mu_0 \beta^2 I^2 D_x}{8\pi^2 (y_a)^2} dy = C_D \rho_a r_a v_a^2 dy \quad (34)$$

e para a junção

$$dW_c + dF_{cc} + dF_{ac} = dF_{D_c}$$

$$-\frac{3\mu_0 I^2 \sin\theta}{16\pi ym} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r \sin\theta}{ym} \right)^2 \right] dy - \frac{\mu_0 \beta^2 I^2 D_x}{8\pi^2 r_j^2} dy + \frac{\mu_0 \beta I^2}{2\pi y_{ac}} dy = C_D \rho_c r_c (U_g - v_j)^2 dy \quad (35)$$

Com as modificações realizadas, o próximo passo é solucionar as equações numericamente.

Como o sistema não é acelerado, temos que

$$dF_{L_a} - dF_{w_a} - dF_{a_a} + dF_{D_a} = 0$$

e

$$dF_{w_c} + dF_{cc} + dF_{ac} + dF_{D_c} = 0$$

Aqui a força de arrasto não muda de sinal, pois o sentido dela depende das velocidades que não são conhecidas. Além disso, todas as equações são multiplicadas por dy , então, é possível dividi-las por ele. Para a raiz do arco no ânodo, temos

$$\frac{\mu_0 I^2}{2\pi y_c} - \frac{3\mu_0 I^2 \sin\theta}{16\pi ym} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r \sin\theta}{ym} \right)^2 \right] - \frac{\mu_0 I^2 D_x}{8\pi^2 y_a^2} + C_D \rho_a r_a v_a^2 = 0 \quad (36)$$

e para a junção

$$-\frac{3\mu_0 I^2 \sin\theta}{16\pi ym} \left[1 - \frac{7}{18} \left(\frac{r \sin\theta}{ym} \right)^2 \right] - \frac{\mu_0 I^2 D_x}{8\pi^2 r_j^2} + \frac{\mu_0 \beta I^2}{2\pi y_{ac}} + C_D \rho_c r_c (U_g - v_j)^2 = 0 \quad (37)$$

Dessa forma, obtemos uma equação algébrica.

Para solucionar as equações, primeiramente é necessário definir os parâmetros que estão nas equações. Nas tabelas abaixo contém todos os parâmetros que são utilizados no cálculo.

Tabela 1 – Parâmetros controláveis

Concentração de gás (Ar/H_2)	50%
Corrente elétrica - I	200 A 350 A 400 A 600 A
Vazão média do gás $-\dot{m}_t$	$1.6087 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ $2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ $1 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Tabela 2 – Parâmetros não controláveis

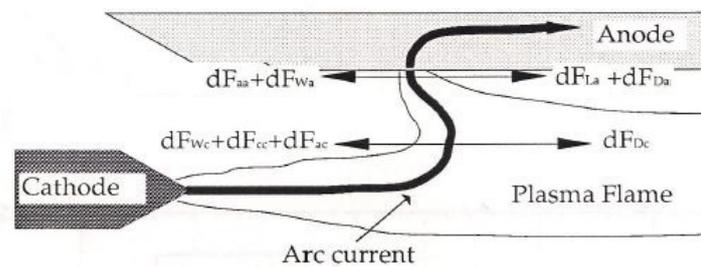
Raio do arco do ânodo na junção - r_j	$1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$
Raio do arco do ânodo na raiz do arco - r_a	$8 \times 10^{-4} \text{ m}$
Raio do cátodo na junção - r_c	$1,25 \times 10^{-3} \text{ m}$
Distância vertical do eixo do bocal do ânodo à raiz do arco - y_c	$2,75 \times 10^{-3} \text{ m}$
Densidade média do gás (T=2000 K)- $\bar{\rho}$	0.1273 kg/m^2
Espessura média de gás frio ao longo do arco catódico (T = 500 K) - y_m	$1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
Espessura da parede bocal y_a	$1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
y_{ac}	$3 \times 10^{-3} \text{ m}$
Área da secção transversal do ânodo - A	$2.3758 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

Portanto, com os parâmetros definidos é possível analisar o comportamento do comprimento arco. Os parâmetros utilizados neste trabalho tem como base as seguinte referências: (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 2013) páginas 418 - 422 e (COLLARES; PFENDER, 1997) página 869.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao calcular as equações do balanço de forças (figura 14) para a raiz do arco e na junção utilizando os parâmetros controláveis (tabela 1) e parâmetros não controláveis (tabela 2), obtêm-se as velocidades na raiz do arco (v_a) e a velocidade na junção (v_j) (tabela 3). Além disso, obtêm-se o comprimento do arco em relação com a variação da corrente de 350 A com variação da vazão de gás (figura 15), em relação à variação da vazão de $1,6087 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ (figura 16), em relação à variação da vazão de $2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ para corrente 200 A e 600 A (figura 17). No gráfico 15 para a corrente fixa, o aumento da vazão influencia no comprimento do arco. No gráfico 16 para a vazão fixa, o comprimento do arco é menor com uma corrente de 600 A. A razão para o comprimento do arco ser menor, é devido a alta densidade de elétrons. O gás ao entrar em contato com o arco tende a esfriá-lo, porém, com correntes altas há alta condutividade, de tal forma, que o gás não afeta a condutividade.

Figura 14 – Balanço total das forças no arco



Fonte: (COLLARES, 1996)

Em correntes baixas, o comprimento é maior porque a densidade de elétrons é baixa. Como o gás esfria a parte do arco em que está em contato, essa parte torna-se isolante. Então, a corrente para manter a densidade de elétrons, vai para outro ponto do ânodo, fazendo com que o arco tenha um comprimento mais longo.

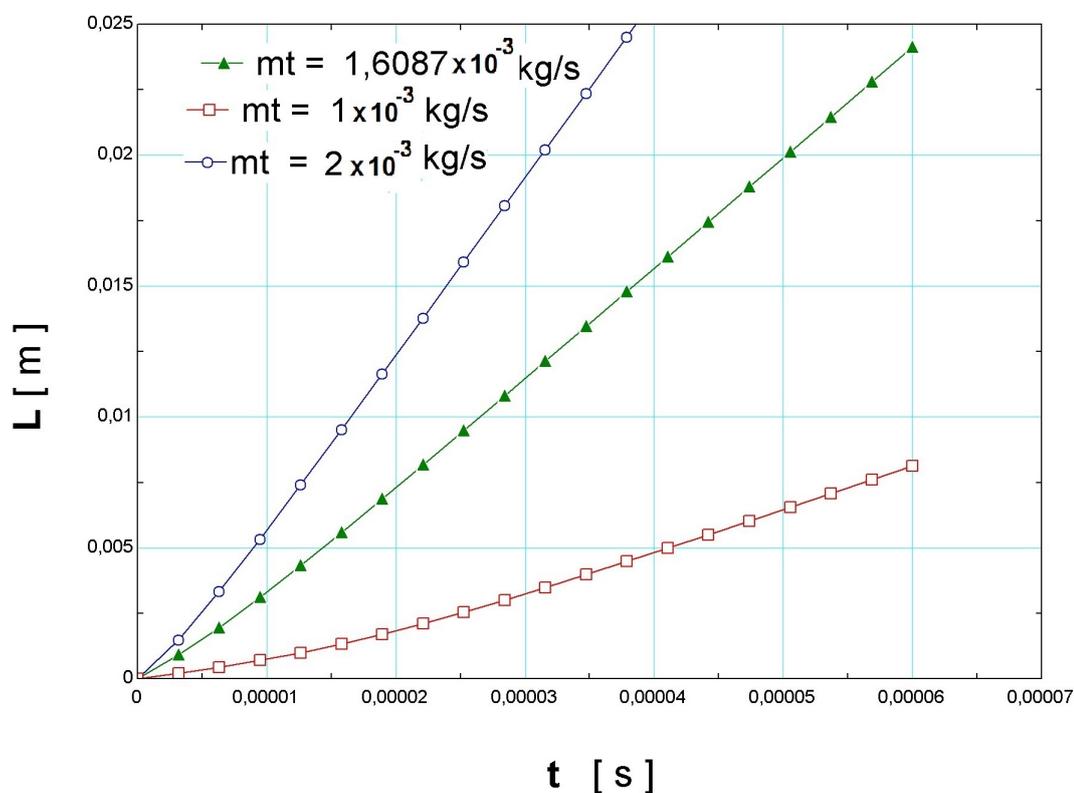
Portanto, se a corrente for alta e a vazão também for alta, o comprimento do arco ainda será menor comparado com uma corrente baixa e a vazão alta como demonstrado no gráfico 17. Dessa forma, é possível observar a relação do comprimento do arco com a vazão do gás e a corrente como os resultados obtidos. A relação da corrente com o comprimento do arco é inverso, pois quanto a corrente aumenta o comprimento do arco é menor, do que o comprimento do arco com uma corrente baixa. A relação da vazão do gás com o comprimento do arco é proporcional, pois ao aumentar a vazão o comprimento do arco aumenta. Além disso, esse modelo estudado corresponde para tochas com confinamento de parede, discutido no capítulo 3 na subseção 3.1.3, e com variação de corrente de 200 A a

400 A e variação da vazão de gás de 40 *L/min* a 100 *L/min* aproximadamente. Na tabela 3 estão as velocidades obtidas com os parâmetros controláveis e não controláveis.

Tabela 3 – Velocidades

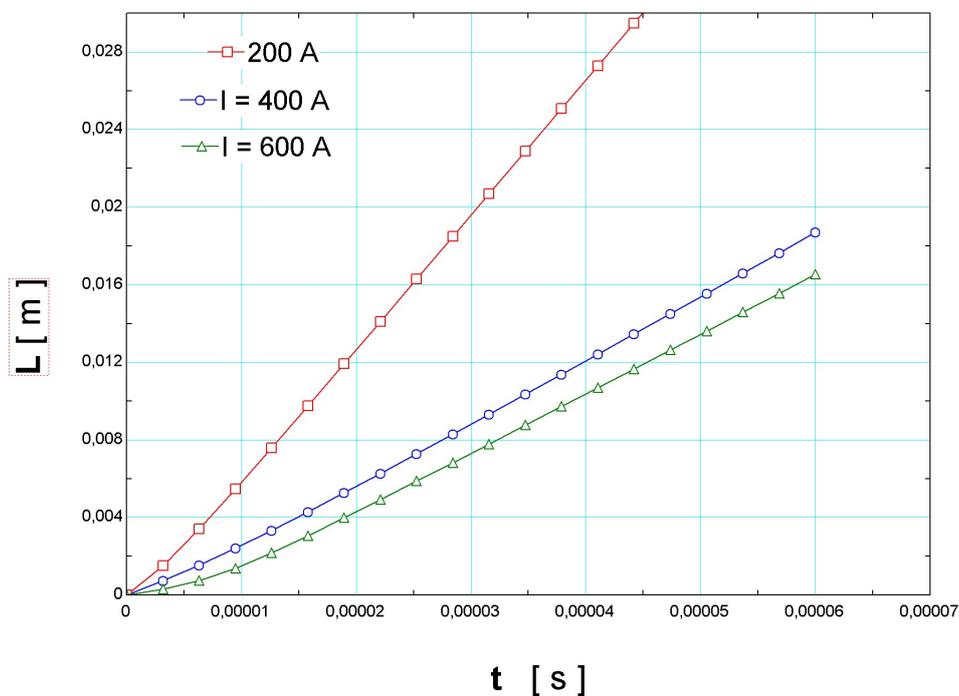
Corrente (A)	V_a (m/s)	V_j (m/s)
200	51,48	173,5
350	109,4	68,84
400	141,6	48,85
600	297	69,45

Figura 15 – Gráfico da variação do comprimento para uma corrente de 350 A com variação da vazão de gás



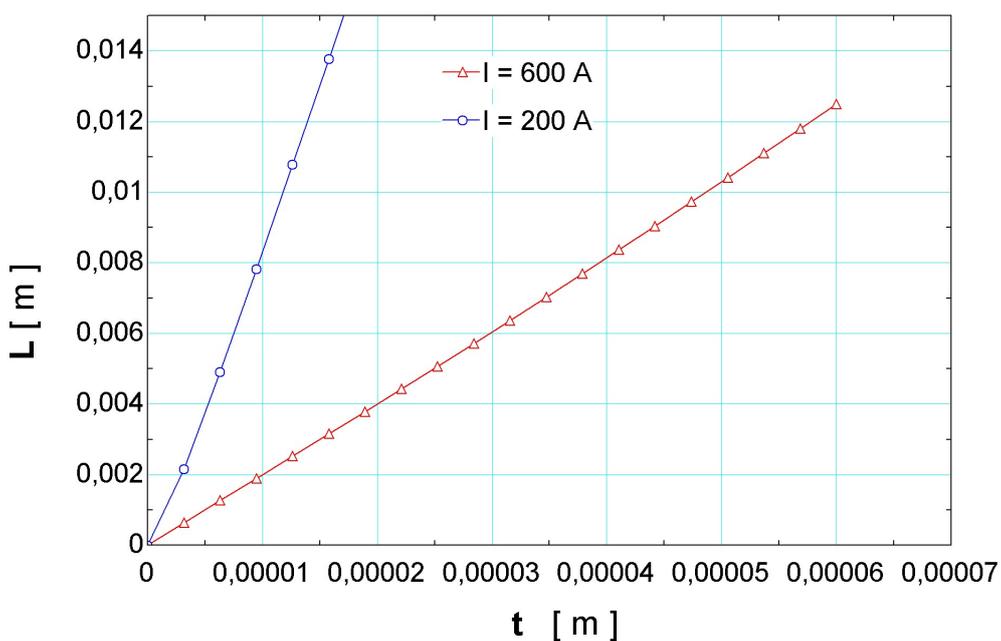
Fonte: Gráfico obtido pelo software

Figura 16 – Gráfico da variação do comprimento com uma vazão de $1,6087 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$



Fonte: Gráfico obtido pelo software

Figura 17 – Gráfico da variação do comprimento com uma vazão de $2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ para corrente 200 A e 600 A



Fonte: Gráfico obtido no software

6 CONCLUSÃO

Desse modo, com o balanço das forças definidos, é possível realizar uma análise mais elaborada das equações. O balanço total das forças na coluna do arco fica de acordo com a figura .

Além disso, com as equações propostas , foi possível obter um balanço de forças que correspondesse realmente ao movimento do arco elétrico no interior da tocha. Portanto, com a análise dos gráficos, foi possível observar que ao aumentar a corrente, o comprimento do arco diminui. E para correntes baixas o comprimento aumenta. A vazão também influencia no comprimento, pois para vazões mais altas o comprimento do arco elétrico aumenta.

O estudo do comportamento do arco pode ser usado para comparar o comportamento do arco na tocha, via osciloscópio, com os cálculos realizados. Por meio experimental, o osciloscópio fornece o gráfico tensão por comprimento. Sabendo, a tensão , o comprimento e ajustando o gráfico ao cálculo feito, é possível, encontrar o campo elétrico. Também pode ser feito uma comparação do cálculo do comprimento do arco com medida do comprimento do arco via sonda magnética.

Referências

- ANGELES, P.; JENNER, P. et al. Estudo de tochas de plasma através da teoria da similaridade. [sn], 2003. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 6.
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Nenhuma citação no texto.
- BOULOS, M. I.; FAUCHAIS, P.; PFENDER, E. **Thermal plasmas: fundamentals and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado na página 18.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos-3**. [S.l.]: Amgh Editora, 2015. Citado na página 12.
- COLLARES, M. P. **Characteristics of dc plasma torches and the use of magnetic probes for diagnostics**. Tese (Doutorado) — University of Minnesota, 1996. Citado 9 vezes nas páginas 1, 2, 5, 7, 11, 13, 14, 15 e 19.
- COLLARES, M. P.; PFENDER, E. Effect of current connection to the anode nozzle on plasma torch efficiency. **IEEE transactions on plasma science**, IEEE, v. 25, n. 5, p. 864–871, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 10, 11, 15 e 18.
- CRUZ, J. R. da; SCOTTI, A. Materiais para eletrodos que emitem termionicamente em soldagem a arco (materials for thermionically emitting electrodes in arc welding). Nenhuma citação no texto.
- ECKERT, E. et al. Thermal analysis of anode and cathode regimes in an electric arc column quarterly progress report no. 7, jan. 1-mar. 31, 1965. 1965. Nenhuma citação no texto.
- GASPERI, J. I. et al. Aplicações do plasma térmico e descarga corona para eliminação de resíduos ambientalmente perigosos. 2008. Citado na página 1.
- GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica, 3ª Edição**. [S.l.]: Editora Pearson Education, 2011. Citado na página 11.
- HEBERLEIN, J. V.; FAUCHAIS, P.; BOULOS, M. I. **Thermal spray fundamentals: From powder to part**. [S.l.]: Springer, 2014. Nenhuma citação no texto.
- LIANG, F. et al. Formation of different arc-anode attachment modes and their effect on temperature fluctuation for carbon nanomaterial production in dc arc discharge. **Carbon**, Elsevier, v. 117, p. 100–111, 2017. Nenhuma citação no texto.
- PLASMA, R. Plasma spray / (sob investigação). 2019. Disponível em: <<http://www.rgplasma.ir/plasmaspray.html>>. Citado na página 2.
- RAT, V.; MAVIER, F.; COUDERT, J.-F. Electric arc fluctuations in dc plasma spray torch. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, Springer, v. 37, n. 3, p. 549–580, 2017. Nenhuma citação no texto.
- ZHUKOV, M. F.; ZASYPKIN, I. **Thermal plasma torches: design, characteristics, application**. [S.l.]: Cambridge Int Science Publishing, 2007. Nenhuma citação no texto.