

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**



**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CAÍQUE SOARES BRAVO**

**Avaliação comparativa dos parâmetros elétricos do arco no processo de soldagem TIG com polaridade CCEN e CCEP**

UBERLÂNDIA-MG

2020

**CAÍQUE SOARES BRAVO**

**Avaliação comparativa dos parâmetros elétricos do arco no processo de soldagem TIG com polaridade CCEN e CCEP**

**Projeto de Conclusão de Curso** apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

UBERLÂNDIA-MG

2020

CAÍQUE SOARES BRAVO

**Avaliação comparativa dos parâmetros elétricos do arco no processo de soldagem TIG com polaridade CCEN e CCEP**

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov – Orientador  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Leandro João da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Profa. Dra. Anna Tokar  
Centro Universitário da Grande Dourados

UBERLÂNDIA-MG  
2020

## DEDICATÓRIA

A Deus e aos meus pais por não terem me deixado desistir.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua graça e misericórdia que repetidas vezes se manifestou na minha vida e na vida da minha família.

Aos meus amados pais, Dolivaldo e Elena, por todo o amor, paciência, dedicação e sacrifício. Amo vocês de todo o meu coração e com todas as minhas forças.

Aos meus irmãos, Alencar e Bruno, por todo apoio e pelas caronas.

Ao pastor Manoel Messias e a sua esposa Luíza, pelas constantes visitas e orações. Vocês lutaram o bom combate e agora estão em um lugar melhor.

À minha amiga Maria José, por tanto se dedicar com oração e sabedoria em ajudar a minha família.

Ao professor Volodymyr Ponomarov, pelo seu conhecimento, dedicação, educação e, principalmente, pela sua boa vontade ao tratar dos temas mais complexos desse trabalho.

Ao mestrando Bruno Henrique Sousa Silva pela sua ajuda na realização dos testes.

Por fim, gostaria de agradecer, novamente, a minha mãe, que foi a pessoa mais dócil e gentil que eu já conheci. Até no seu último dia manteve-se sempre fiel e alegre, apesar do sofrimento. Mãe, a saudade é muita, mas procuro me fortalecer no seu exemplo e nas lembranças que temos juntos. Sei que mesmo doente você se preocupava mais comigo do que com você. O seu amor era incondicional. Saiba que ter você como mãe foi a melhor coisa que já me aconteceu. Eu te amo e espero ter sido capaz de expressar esse amor. Mãe, muito obrigado por tudo.

BRAVO, C. S. **Avaliação comparativa dos parâmetros elétricos do arco no processo de soldagem TIG com polaridade CCEN e CCEP**. 2020. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa dos parâmetros elétricos do arco no processo de soldagem TIG com polaridade corrente contínua eletrodo negativo (CCEN) e corrente contínua eletrodo positivo (CCEP), além de estimar o balanço térmico em cada situação e verificar a influência da polaridade e do método de emissão de elétrons no desgaste do eletrodo de tungstênio. Com esse propósito em mente foram realizados uma série de experimentos em ambas as polaridades, com eletrodos de tungstênio toriado (2%) de 1,6 e 4 mm de diâmetro, nas correntes de 60 e 15 A e alterando a distância entre o eletrodo e a peça de 2 a 4 e a 6 mm. Durante os testes foram feitas aquisições dos sinais de tensão e corrente que mostraram que, para todas as situações analisadas, há sempre uma maior quantidade de energia gerada pelo arco na polaridade CCEP, mas que a maneira como essa energia é dividida entre o cátodo e o ânodo é bastante diferente daquela encontrada na polaridade CCEN. Foi mostrado que, independente da polaridade, é o metal de base que absorve a maior parte do calor gerado pelo arco.

**Palavras-chave:** Soldagem, Parâmetros Elétricos, Tensão, CCEN, CCEP, TIG

Bravo, C. S. **Comparative evaluation of the electric arc parameters in the TIG welding process with DCEN and DCEP polarity.** 2020. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

### **ABSTRACT**

This work aims to perform a comparative analysis of the electric arc parameters in the TIG welding process with direct current electrode negative (DCEN) and direct current electrode positive (DCEP), in addition to estimating the thermal balance in each situation and verifying the influence of polarity and electron emission method on the wear of the tungsten electrode. With this purpose in mind, a series of experiments were carried out in both polarities, with thoriated tungsten (2%) of 1.6 and 4 mm in diameter, in currents of 60 and 15 A and changing the distance between the electrode and the part from 2 to 4 and 6 mm. During the tests, voltage and current signals were acquired, which showed that, for all situations analyzed, there is always a greater amount of energy generated by the arc in the CCEP polarity, but the way this energy is divided between the cathode and the anode is quite different from that found in the CCEN polarity. It has been shown that, regardless of polarity, it is the base metal that absorbs most of the heat generated by the arc.

**Keywords:** Welding, Electrical Parameters, Voltage, DCEN, DCEP, TIG

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Soldagem TIG.....	2
Figura 2.2- Emissão por Campo.....	5
Figura 2.3 - Região esbranquiçada devido a limpeza catódica. ....	6
Figura 2.4 - Mobilidade da mancha catódica (CCEP). ....	6
Figura 2.5 - Instabilidade do arco associado a inversão de polaridade para uma onda senoidal.....	7
Figura 2.6 - Entendimento usual sobre CA.....	8
Figura 2.7 - Oscilogramas de tensão correspondentes a cada Porcentual de Eletrodo Positivo testado. ....	8
Figura 2.8 - Analogia do arco elétrico com resistências em série. ....	12
Figura 2.9 - Aumento do comprimento do arco elétrico e seus efeitos.....	13
Figura 2.10 - Distribuição da tensão ao longo do arco elétrico-TIG. ....	14
Figura 2.11 - Distribuição da tensão ao longo do arco elétrico-GMAW.....	14
Figura 2.12 - Tensão do arco vs seu comprimento. ....	16
Figura 2.13 - Área de atuação da mancha anódica (A1) e catódica (A2). ....	17
Figura 3.1- Fonte IMC-INVERSAL 300. ....	19
Figura 3.2 - Cilindros de Argônio (Ar).....	20
Figura 3.3 - Eletrodos de 1.6 e 4 mm de diâmetro. ....	21
Figura 3.4- Tochas para os eletrodos de 4 e 1.6 mm.....	21
Figura 3.5 - Bancada de teste. ....	22
Figura 3.6 - Mecanismo de fixação da peça.....	22
Figura 3.7 - Condicionador de sinal.....	23
Figura 3.8 - Placa de aquisição .....	23
Figura 3.9 - Sensor Hall. ....	24
Figura 4.1- Sistema de movimentação utilizado.....	25
Figura 5.1 - 60 A CCEN 4 mm.....	27
Figura 5.2 - 60 A CCEP 4 mm.....	27
Figura 5.3 - 60 A CCEN 1,6 mm.....	27
Figura 5.4 - 15 A CCEP 1,6 mm.....	27
Figura 5.5 - 15 A CCEN 1,6 mm.....	28
Figura 5.6 - 15 A CCEN 4 mm.....	28



Figura 5.7 - Relação entre a distância eletrodo/peça e o comprimento do arco na polaridade CCEP.....	28
Figura 5.8 - 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm .....	29
Figura 5.9 - 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEN 1,6 mm.....	31
Figura 5.10 - 15 A CCEP 1,6 mm X 15 A CCEN 1,6 mm X 60 A CCEN 1,6 mm X 15 A CCEN 4 mm. ....	32
Figura 5.11 - Pontos de trabalho para as situações: CCEN-15 A-4mm e CCEN-60 A-1,6 mm. ....	32
Figura 5.12 - 15 A CCEP 1,6 mm X 60 A CCEP 4 mm. ....	33
Figura 5.13 - Eletrodo com 4 mm de diâmetro. ....	34
Figura 5.14 - Eletrodo com 1,6 mm de diâmetro. ....	34
Figura 5.15 - Balanço térmico: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm. ....	37
Figura 5.16 - Distribuição do calor ao longo do arco elétrico na soldagem TIG (com eletrodo não consumível), com o comprimento do arco de $\approx 4$ mm, $I_s \approx 60$ A, gás de proteção – Argônio.).....	38
Figura 5.17 - Valores recomendados de corrente para os eletrodos de tungstênio para soldagem TIG nas polaridades CCEP e CCEN.....	39
Figura 5.18 - Gráficos das tensões. ....	39
Figura 5.19 - CCEN,4 mm, 60 A.....	40
Figura 5.20 - CCEP, 4 mm, 60 A.....	41

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1- Dados técnicos da fonte utilizada.....	19
Tabela 5.1- Resultados encontrados.....	26
Tabela 5.2 - 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm.....	35
Tabela 5.3 - Balanço térmico: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm.....	37

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

- A - Constante de Richardson corrigida  
Ar – Argônio  
At - Área transversal  
CC – Corrente contínua  
CCEN – Corrente contínua eletrodo negativo  
CCEP - Corrente contínua eletrodo positivo  
E - Campo elétrico  
GTAW - Gas-Shielded Tungsten Arc Welding  
Ha - Calor absorvido no ânodo  
Hc - Calor absorvido no cátodo  
I - Corrente  
J - Densidade de corrente  
Je - Densidade de corrente carregada pelos elétrons  
Ji - Densidade de corrente carregada pelos íons  
k - Constante de Boltzmann  
L - Comprimento do eletrodo  
la - Comprimento da coluna de plasma  
Q - Potência ou energia  
QAbs.Âno, Qa – Calor absorvido no ânodo  
QAbs.Cát, Qc – Calor absorvido no cátodo  
QAbs.Col – Calor absorvido na coluna de plasma  
QGer.Âno – Calor gerado no ânodo  
QGer.Cát – Calor gerado no cátodo  
QGer.Col – Calor gerado na coluna de plasma  
QT - Energia necessária para o aquecimento até a temperatura da coluna do arco  
Qva- Energia gerada pela passagem de elétrons pela região de queda anódica  
Qvc - Energia gerada pela passagem de elétrons pela região de queda catódica  
Q $\emptyset$  - Energia necessária para a emissão de elétrons  
R - Resistência elétrica  
T, t - Temperatura ou tempo  
TIG - Tungsten Inert Gas  
Va - Queda de tensão anódica

Varco- Queda de tensão no arco

Vc - Queda de tensão catódica

Vcol- Queda de tensão na coluna de plasma

Vi - Potencial de ionização do plasma

W - Tungstênio

$\phi$  - Função trabalho

$\rho$  - Resistividade do material

## Sumário

1.INTRODUÇÃO .....	1
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM TIG (TUNGSTEN INERT GAS).....	2
2.2 EQUIPAMENTOS.....	3
2.3 MODOS DE OPERAÇÃO .....	3
2.3.1 Corrente Contínua (CC) .....	3
2.3.2 Corrente Alternada (CA).....	6
2.4 ARCO ELÉTRICO .....	11
2.4.1 Modelo Elétrico.....	12
2.4.2 Modelo Físico .....	15
3.EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	19
4.METODOLOGIA.....	24
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	26
5.1 ANÁLISE DAS TENSÕES ELÉTRICAS .....	29
5.1.1 Comparação I: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm.....	29
5.1.2 Comparação II: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEN 1,6 mm.....	30
5.1.3 Comparação III: 15 A CCEP 1,6 mm X 15 A CCEN 1,6 mm X 60 A CCEN 1,6 mm X 15 A CCEN 4 mm .....	31
5.1.4 Comparação IV: 15 A CCEP 1,6 mm X 60 A CCEP 4 mm.....	33
5.2 BALANÇO TÉRMICO .....	34
5.2.1 Comparação: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm.....	35
5.3 ANÁLISE DAS CURVAS DE TENSÃO.....	39
6.CONCLUSÕES .....	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43

## 1.INTRODUÇÃO

O processo de soldagem TIG é bastante estudado. Os especialistas sabem que para soldar aços, a polaridade recomendada é CCEN. Para soldar ligas de alumínio deve ser usada corrente alternada (CA). Já a polaridade CCEP deve ser evitada ou utilizada com uma corrente bem menor, pois neste caso o eletrodo de tungstênio pode ser sobreaquecido muito rapidamente.

A explicação comum desta diferença no que diz respeito ao valor da corrente permitida numa polaridade e na outra é a seguinte. Na polaridade CCEN, quando o eletrodo de tungstênio é cátodo, a emissão dos elétrons acontece através do fenômeno denominado “Emissão Termiônica” (também chamada de emissão por “Cátodos Quentes”), que é acompanhada pela baixa absorção do calor na região catódica para uma dada corrente (aquece pouco o eletrodo) e pela transferência de calor, através dos elétrons, do cátodo para o ânodo. A emissão termiônica acontece a altas temperaturas em alguns materiais de alto ponto de fusão e refratários (como tungstênio), que passam a emitir elétrons espontaneamente.

Na polaridade CCEP, quando o eletrodo de tungstênio vira ânodo, a emissão dos elétrons acontece pela “Emissão por Campo”, também conhecida como emissão por “Cátodo Frio”, onde há uma maior geração de calor e nenhum efeito de resfriamento está presente no tungstênio, o que resulta no seu desgaste.

Neste trabalho será realizado um estudo comparativo dos parâmetros elétricos do processo de soldagem TIG nas polaridades CCEN e CCEP, variando os parâmetros de corrente, distância eletrodo/peça e diâmetro do eletrodo de tungstênio. Utilizando os dados de tensão encontrados para em cada situação também será realizada uma estimativa do balanço térmico para cada polaridade e uma análise dos valores, do comportamento e do formato das curvas de tensões encontradas. Essa pesquisa é justificada pela escassez de informações detalhadas sobre o assunto na literatura.

## 2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM TIG (*TUNGSTEN INERT GAS*)

A soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*, como conhecida na Europa) ou GTAW (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*, como conhecida nos EUA) é um processo caracterizado pela união permanente por fusão localizada de peças metálicas, sob uma atmosfera inerte, através da ação do arco elétrico formado entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a peça (Fig. 2.1).

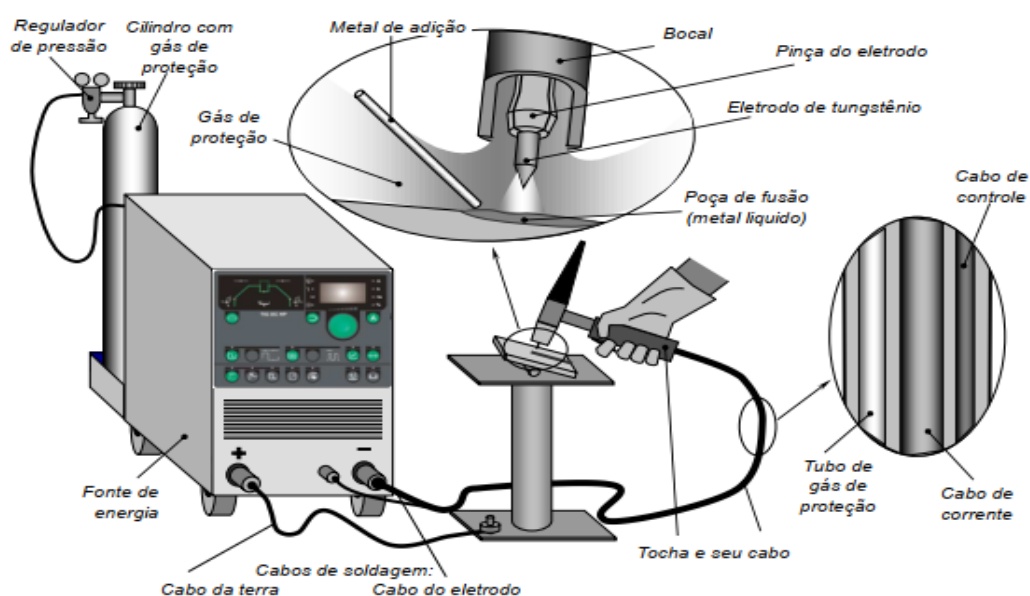


Figura 2.1- Soldagem TIG. Fonte: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

O processo TIG pode ser realizado de maneira manual ou automatizada. A obrigatoriedade de uma atmosfera inerte, geralmente de argônio ou hélio (ou mistura deles), é feita para preservar o eletrodo (o tungstênio é altamente reativo em elevadas temperaturas) e a poça de fusão contra oxidações e contaminantes externos, como nitrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono.

Embora o processo TIG seja capaz de produzir soldas com ótimo acabamento e qualidade superficial, sem presença de escórias, fumos ou respingos, exigindo pouca ou nenhuma limpeza após a operação, ele é utilizado principalmente quando a qualidade da solda é mais importante do que a produtividade, pois os custos dos

equipamentos e consumíveis envolvidos são elevados e a taxa de deposição é baixa ( $\leq 0,5$  Kg/h). Além disso, para o processo manual a destreza e experiência do soldador são variáveis importantes para garantir um bom cordão de solda.

## 2.2 EQUIPAMENTOS

Os principais equipamentos para a soldagem TIG são:

- Fonte de energia;
- Tocha com o eletrodo de tungstênio;
- Sistema de alimentação do gás de proteção.

## 2.3 MODOS DE OPERAÇÃO

Observa-se que em todos os processos de soldagem por fusão, o arco elétrico funciona como um transdutor de energia elétrica em calor, permitindo a fusão do metal de base, do eletrodo (ou apenas o seu aquecimento, como no processo TIG) e, caso necessário, do metal de adição.

Todavia, a distribuição do calor no cátodo e no ânodo são diferentes. Nos processos de soldagem a arco com eletrodo consumível a polaridade da corrente é usada como um parâmetro tecnológico: se precisar de uma maior taxa de deposição é usada polaridade eletrodo negativo (CCEN), e, ao contrário, se precisar maior penetração, usa-se a polaridade eletrodo positivo (CCEP). Em ambos os casos as características físicas tanto do ânodo, como do cátodo, permanecem as mesmas (apenas trocam de lugares). Mas, este não é caso no processo TIG, onde, devido os aspectos físicos exigidos, a emissão termiônica (ou emissão por “Cátodo Quente”) irá ocorrer apenas na polaridade CCEN.

### 2.3.1 Corrente Contínua (CC)

#### 2.3.1.1 Corrente Contínua Eletrodo Negativo (CCEN)



Nesta condição de operação, o eletrodo de tungstênio é conectado ao terminal negativo da fonte, tornando-se o cátodo, por onde os elétrons são emitidos em direção ao metal de base (ânodo) por efeito termiônico, que é explicado da seguinte maneira por MODENESI (2012, pg.12): “A emissão termiônica decorre, basicamente, do aquecimento do material do cátodo a uma temperatura suficientemente alta para causar a emissão (ou "vaporização") de elétrons em sua superfície por agitação térmica”. Essa emissão de elétrons é espontânea e, de acordo com a lei Richardson (1), está relacionada com a densidade de corrente encontrada na ponta do eletrodo de tungstênio, que será maior quanto maior for a temperatura do cátodo e menor a sua função trabalho (energia mínima para que o elétron seja ejetado da superfície do metal). Assim sendo, para que ocorra a emissão termiônica é necessário que o material do cátodo seja refratário, suportando elevadíssimas temperaturas, de elevado ponto de fusão e com baixa função trabalho, tal qual o tungstênio.

$$J = A * T^2 * \exp\left(\frac{-\phi * e}{k * T}\right) \quad (1)$$

Os termos da equação 1 são apresentados de forma que J é a densidade de corrente (A/m<sup>2</sup>), A é uma constante (6-7\*10<sup>5</sup> A\*m<sup>-2</sup>\*K<sup>-2</sup>),  $\phi$  é a função trabalho do material do cátodo (eV), e é a carga do elétron (1,6\*10<sup>-19</sup>C), k é constante de Boltzmann ( 1,38\*10<sup>-23</sup> J/K) e T é temperatura da superfície do cátodo (K).

Embora essa polaridade não proporcione uma limpeza da camada de óxidos, ela é conhecida por produzir um cordão de solda profundo, estreito e com uma maior área fundida, pois, como estimado pela literatura corrente [7-9], cerca de 60-70% do calor gerado é absorvido pela peça, favorecendo o uso da CCEN em peças maciças, grossas ou de elevada condutividade térmica, onde a perda de calor pode ser compensada por um arco mais quente e estável.

### 2.3.1.2 Corrente Contínua Eletrodo Positivo (CCEP)

Quando o polo negativo da fonte é conectado à peça, o mecanismo de emissão de elétrons não pode ser pelo efeito termiônico, devido ao baixo ponto de fusão dos

matérias comumente usados, como alumínio, e, segundo MODENESI e BRACARENSE (2004), devido a uma grande área catódica necessária para sustentar uma corrente de soldagem. Embora não esteja claro quais são os mecanismos atuantes na emissão por “cátodo frio”, várias propostas foram feitas para explicar esse fenômeno, porém esse trabalho irá considerar a emissão por campo como o meio mais significativo. MODENESI e BRACARENSE descrevem a emissão de campo (Fig. 2.2) da seguinte maneira:

[...] aparentemente, envolve a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido, pela adsorção de ions positivos, o que leva à formação de filetes condutores no óxido, à emissão de elétrons, à destruição da camada neste local e, conseqüentemente, do ponto de emissão [...] (2004, pg. 30)

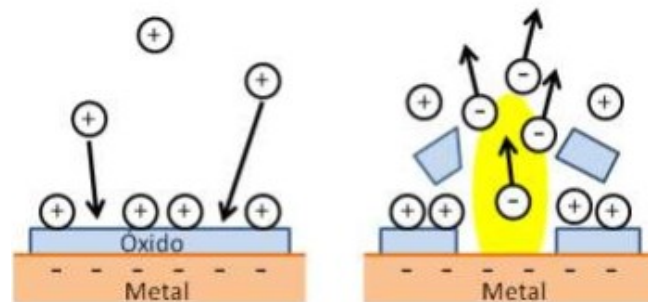


Figura 2.2- Emissão por Campo. Fonte: Modenesi (2012)

Devido a destruição da camada de óxido pela passagem dos elétrons, a polaridade CCEP é caracterizada pela “limpeza catódica” (região esbranquiçada na Fig. 2.3) e por uma menor estabilidade do arco na região catódica causada pela, segundo MODENESI e BRACARENSE (2004, pg. 104), “grande mobilidade associada à necessidade do cátodo se fixar em pontos de oxidação para a emissão de elétrons” (Fig. 2.4). Essa mobilidade irá resultar em cordões mais largos do que aqueles produzidos pela emissão termiônica.



Figura 2.3 - Região esbranquiçada devido a limpeza catódica. Fonte: O autor

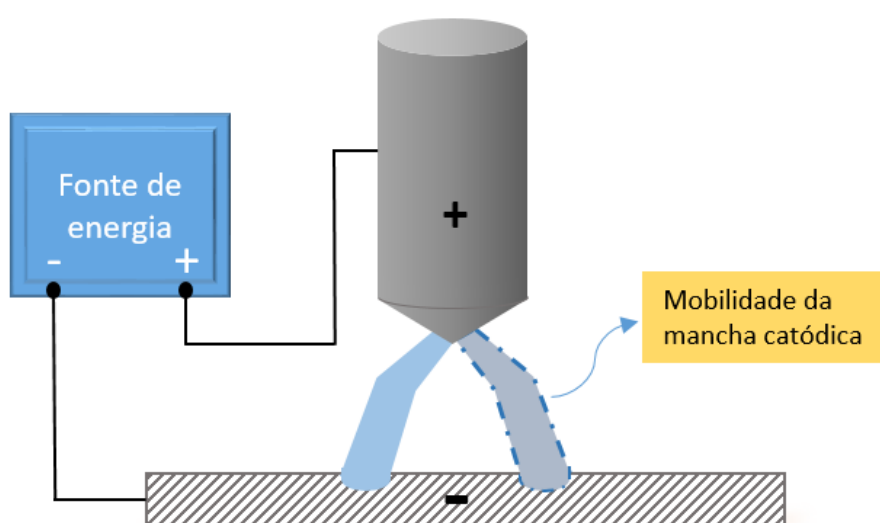


Figura 2.4 - Mobilidade da mancha catódica (CCEP). Fonte: O autor

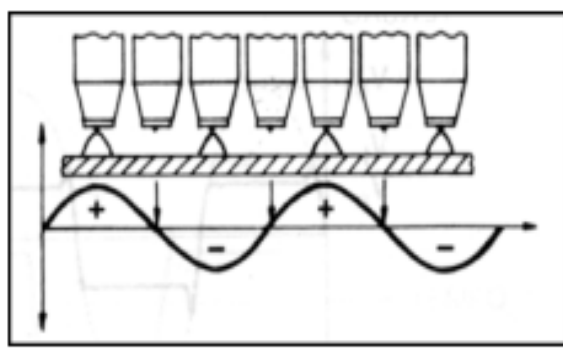
Quando utilizado CCEP, a literatura [7-9] estima-se que apenas 30-40% do calor gerado fica na peça, resultando em cordões de solda mais rasos, ideais para peças finas, e 60-70% do calor gerado irá para o ânodo, provocando o superaquecimento do eletrodo de tungstênio e conseqüente deterioração. Assim sendo, para uma mesma corrente, a polaridade CCEP requer o uso de um eletrodo de tungstênio de maior diâmetro e com um ângulo de ponta mais aberto para que seja evitado o seu aquecimento exagerado.

### 2.3.2 Corrente Alternada (CA)

Com o uso da corrente alternada na soldagem TIG, a polaridade do eletrodo se inverte em cada meio-período, proporcionando ao cordão de solda aspectos intermediários

aos apresentados na CCEN e na CCEP, ou seja, com um nível mediano de penetração e com remoção da camada de óxidos.

Quando em CA a fonte tem um papel especialmente importante, pois fontes eletromagnéticas são incapazes de alterar a forma da onda de corrente e a frequência de inversão da polaridade, replicando as características encontradas na rede elétrica. Por outro lado, fontes eletrônicas, mais modernas que as anteriores, são capazes de proporcionar um formato retangular da curva de corrente, permitindo uma troca de polaridade quase que imediata e, dessa maneira, reduzem o risco de instabilidade do arco durante a inversão de polaridades, evitando o apagamento do arco nestes momentos (Fig. 2.5).



*Figura 2.5 - Instabilidade do arco associado a inversão de polaridade para uma onda senoidal.  
Fonte: Material didático do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov (2020)*

Além disso, as fontes eletrônicas também permitem o ajuste do tempo de atuação que cada polaridade terá durante um ciclo e, sobre esse aspecto, o entendimento usual diz que a predominância da polaridade negativa resultaria em cordões mais profundos, enquanto tempos maiores de atuação da polaridade positiva geraria uma maior remoção da camada de óxidos (Fig. 2.6). Porém, como demonstrado por Fuerschbach (1998), Yarmuch e Patchett (2007) e Cirino (2009), um maior predomínio do tempo da polaridade positiva resulta numa maior fusão do alumínio, uma vez que a tensão exigida para emissão de elétrons será maior, o que ocasiona um aumento do calor gerado na peça e, portanto, maior fusão do metal. Ou seja, o pensamento usual demonstrado na Fig. 2.6 é equivocado.

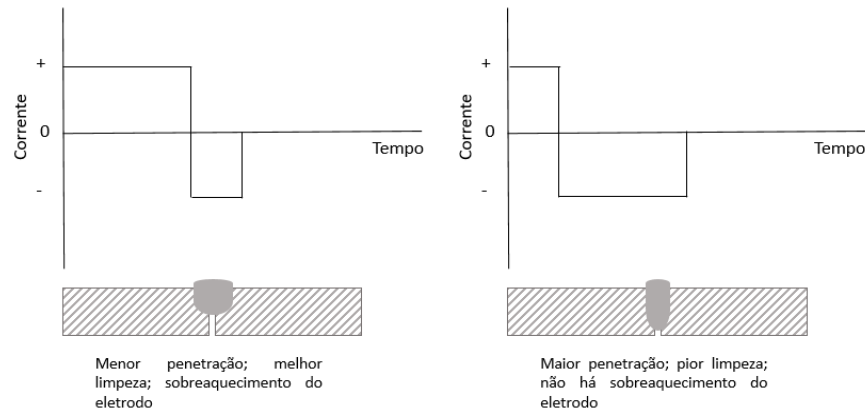


Figura 2.6 - Entendimento usual sobre CA. Fonte: O autor

Também é observado por Cirino (2009) que um aumento da atuação da CCEP resulta na elevação da tensão durante a fase positiva e numa diminuição do potencial durante a fase negativa (Fig. 2.7). Essa diminuição indica que a emissão termiônica é facilitada pelo aquecimento do eletrodo de tungstênio durante as fases positivas. No entanto, devido à ausência de qualquer efeito de resfriamento e aos choques de elétrons, nota-se que o aumento do tempo de ação da polaridade CCEP também é acompanhado de um desgaste mais expressivo do eletrodo de tungstênio.

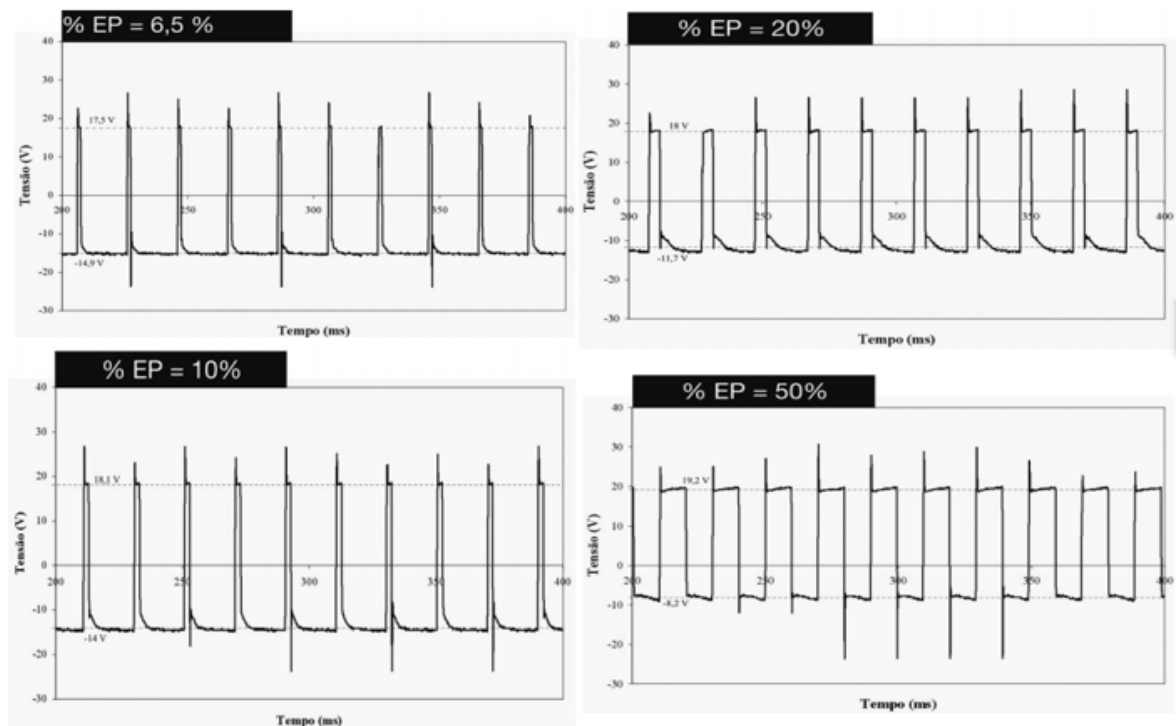


Figura 2.7 - Oscilogramas de tensão correspondentes a cada Porcentual de Eletrodo Positivo testado. Fonte: (Cirino, 2009)

## 2.4 BALANÇO TÉRMICO

O balanço térmico pode ser analisado do aspecto do calor gerado e do calor absorvido, de modo que nem todo o calor gerado no cátodo será absorvido pelo mesmo, mas terá uma parcela transferida para o ânodo.

Para o caso da polaridade CCEN, há diversas equações propostas por diferentes autores que tentam estimar o calor no cátodo e no ânodo, de modo que parece não haver um consenso sobre quais são as equações responsáveis por descrever com melhor propriedade a geração e a distribuição de calor na polaridade negativa. Tal dificuldade é, no entanto, bem justificada dada a complexidade dos fenômenos envolvidos.

Como descrito por Cirino [1], Fuerschbach [2] defende que na polaridade negativa o calor presente no ânodo pode ser considerado igual ao calor resultante do choque de elétrons acelerados pela queda de tensão anódica mais a energia presente em cada elétron devido a sua função trabalho. Esse pensamento é descrito na Equação (2).

$$H_a = j (V_a + \phi) \quad (2)$$

Onde  $H_a$  é o calor resultante no ânodo,  $j$  é a densidade de corrente,  $V_a$  é a queda de tensão na região anódica e  $\phi$  é a função trabalho.

A estimativa para o calor presente no cátodo decorrente da emissão termiônica é significativamente mais complexa e é dada pela Equação (3), proposta por Cobine [14] e citada tanto por Cirino [1] quanto por Fuerschbach [2].

$$H_c = j_i * V_c - j_i * \phi + j_i * V_i - j_e * \phi = j_i (V_c + V_i - \phi) - j_e * \phi \quad (3)$$

Os termos dessa equação são definidos como  $H_c$  sendo o calor no cátodo,  $j_i$  a densidade de corrente carregada pelos ions,  $V_c$  a queda de tensão catódica,  $V_i$  o potencial de ionização do plasma,  $j_e$  a densidade de corrente carregada pelos elétrons e  $\phi$  é a função trabalho.

Observa-se na Equação (3) que enquanto há energia sendo fornecida pela aceleração de íons na região de queda de tensão catódica ( $j_i \cdot V_c$ ) e pela neutralização de íons na superfície do cátodo ( $j_i \cdot V_i$ ), há também perdas de energia resultante da emissão de elétrons ( $j_e \cdot \phi$ ) e da neutralização íons positivos por elétrons ( $j_i \cdot \phi$ ).

A perda de energia resultante da emissão de elétrons mostra que cada elétron ejetado leva consigo uma quantidade de energia  $\phi$  que será provida pelo cátodo e entregue ao ânodo (metal de base), resultando no seu aquecimento e fusão. Esse fenômeno assegura que, na polaridade CCEN, apenas uma fração do calor gerado no cátodo permaneça no mesmo, de sorte que a maior parte é transferida para o ânodo, garantindo ao eletrodo um efeito de resfriamento (*cooling effect*) e, dessa maneira, impedindo o seu aquecimento e desgaste.

M.A.R Yarmuch e B.M Patchett [10], J.F Lancaster [11] e Modenesi [8] apresentam outro meio de estimar o calor absorvido no cátodo e no ânodo (Equações 6 e 7) quando utilizada a polaridade CCEN. Sendo que Modenesi [8] inicia seus raciocínios pelas Equações 4 e 5:

$$Q_c = -QT + QV_c - Q\phi \quad (4)$$

$$Q_a = QT + QV_a + Q\phi \quad (5)$$

Dessa maneira, observa-se que a energia que poderá difundir-se pelo cátodo ( $Q_c$ ) ou ânodo ( $Q_a$ ) está relacionada com a energia gerada pela passagem de elétrons pela região de queda ( $Q_{vc} = V_c \cdot I$  ou  $Q_{va} = V_a \cdot I$ , sendo  $V_c$  e  $V_a$  as tensões catódica e anódica e  $I$  a corrente), com a energia necessária para a emissão de elétrons ( $Q_\phi = I \cdot \phi$ , onde  $\phi$  é a função trabalho, 4,5 eV para o tungstênio e 4,0 eV para o aço) e com a energia necessária para o aquecimento destes até a temperatura da coluna do arco ( $QT = \frac{3 \cdot k \cdot T \cdot I}{2 \cdot e}$ , onde  $T$  é a temperatura do arco,  $k$  é a constante de Boltzmann  $1,38065 \cdot 10^{-23}$  J/K e  $e$  a carga do elétron  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C). Após algumas manipulações matemáticas chega-se nas equações (6) e (7):

$$Q_c = I * \left( -\frac{3 * K * T}{2 * e} + V_c - \phi \right) \quad (6)$$

$$Q_a = I * \left( +\frac{3 * K * T}{2 * e} + V_a + \phi \right) \quad (7)$$

Para a polaridade CCEP o mecanismo de emissão por campo ainda não é bem compreendido, o que dificulta a busca por informações detalhadas sobre o balanço térmico nessa situação. No entanto, como será mostrado nos capítulos seguintes, as Equações 6 e 7 revelaram-se adequadas para a análise da polaridade CCEP.

## 2.4 ARCO ELÉTRICO

Arco voltaico é a passagem de uma grande quantidade de corrente elétrica através de uma atmosfera inicialmente gasosa e/ou de vapores metálicos (gerados a partir dos eletrodos), posteriormente ionizada (virando o plasma), entre dois eletrodos submetidos a uma diferença de potencial, podendo produzir energia térmica suficiente para ser usada em soldagem, pela fusão localizada das peças a serem unidas e, quando necessário, do metal de adição.

O arco elétrico é formado por três regiões com características próprias, sendo elas: zona catódica, coluna de plasma e zona anódica e, em termos de volume, o arco é constituído quase que exclusivamente pela coluna de plasma, que pode ter vários milímetros de comprimento (normalmente de 1 a 10 mm), enquanto que as regiões anódica e catódica têm espessuras da ordem de apenas 1  $\mu\text{m}$ .

Dada a complexidade do arco elétrico é interessante simplificar a sua análise e, tendo isso em mente, serão usados dois modelos diferentes, o modelo elétrico e o modelo físico. No modelo elétrico o calor gerado em cada região é quantificado pelo efeito Joule (Equação 8), onde Q é a energia térmica [Joules]; V é a tensão [Volts]; I é a corrente [Ampere] e t é o tempo [segundos]. Todavia, o calor gerado no cátodo, por exemplo, não é totalmente consumido pelo mesmo, havendo uma transferência de calor, por meio dos elétrons, para a região anódica. Esse modelo elétrico não é capaz de explicar tal fenômeno de transferência e por isso, faz-se necessário o estudo do modelo físico, que leva em consideração a geração e movimentação das cargas



elétricas no arco e, dessa maneira, a transferência de calor entre as regiões do arco e o meio ambiente. Todavia, graça as complexidades dos fenômenos físico-químicos envolvidos, esse modelo torna-se menos preciso que o anterior.

$$Q = V * I * t \quad (8)$$

### 2.4.1 Modelo Elétrico

Considerando-se as três regiões constituintes do arco elétrico e sabendo-se que há nelas uma passagem de corrente, haverá também uma queda de tensão e mesmo que o arco não seja uma resistência ôhmica, uma analogia com um circuito de resistências em série pode ser feita para ilustrar as variações de tensões (Fig. 2.8).

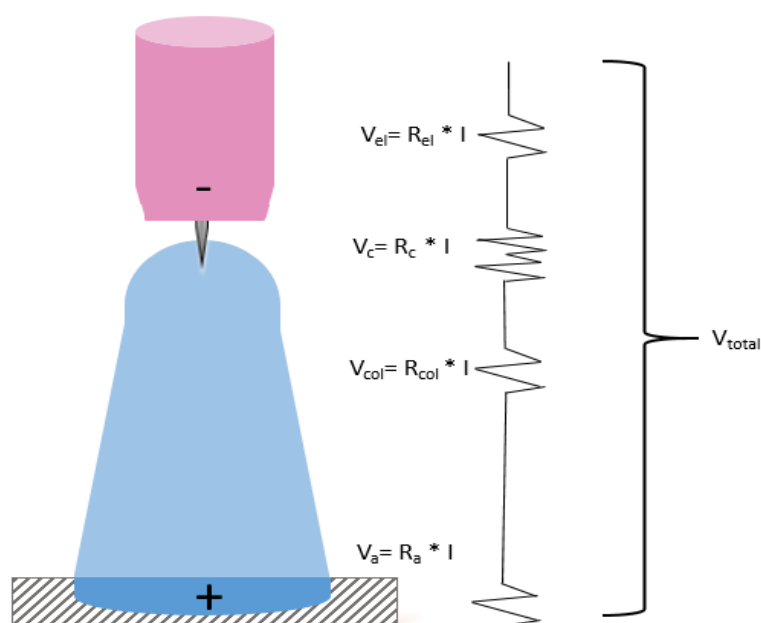


Figura 2.8 - Analogia do arco elétrico com resistências em série. Fonte: O autor

A queda de tensão na própria coluna de plasma não excede alguns (poucos) volts e varia de acordo com o comprimento do arco, isto é, um aumento da tensão é, normalmente, resultado de um aumento da distância entre o eletrodo e a peça. No entanto, quando isso acontece a eficiência térmica do processo diminui, pois, conforme observado por Leite (2018), mantendo-se a corrente constante, o calor extra produzido pela elevação da tensão não é transferido para a peça, mas acaba sendo perdido para o ambiente por convecção e radiação. Além disso, a densidade de calor

na região do metal de base será menor, uma vez que a largura do cordão será maior. Esse efeito é ilustrado na Fig. 2.9.

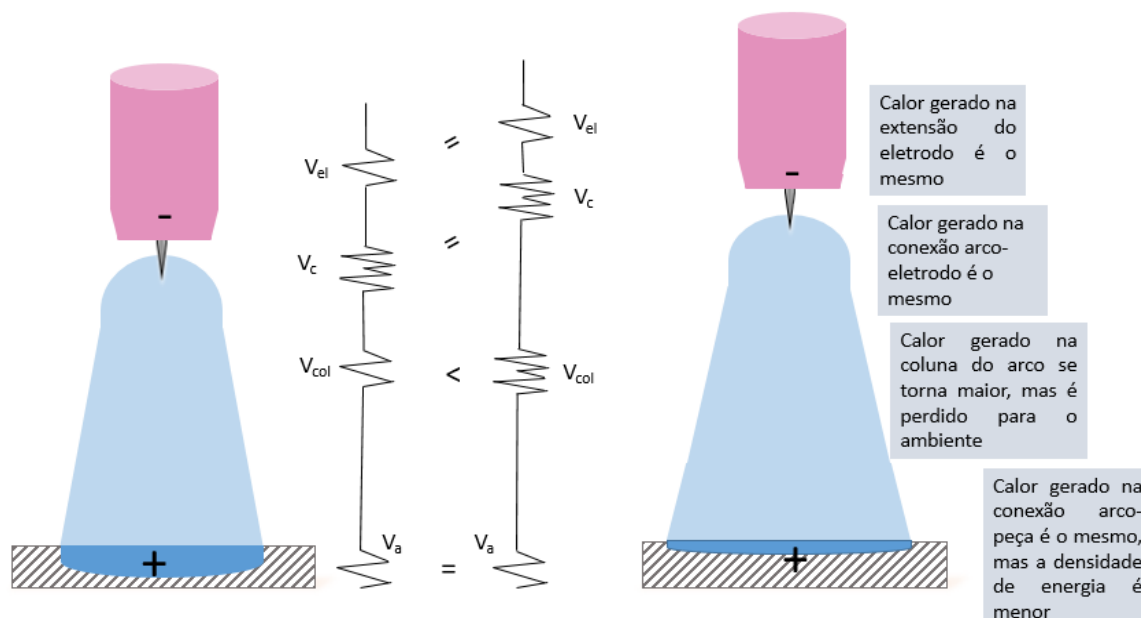


Figura 2.9 - Aumento do comprimento do arco elétrico e seus efeitos. Fonte: O autor

Mesmo que o volume do arco seja representado quase que exclusivamente pela coluna de plasma, a região catódica é a principal responsável pela existência e estabilidade do arco, pois, independente da polaridade usada, ela é a principal fonte de elétrons. Todavia, o valor da tensão varia muito de acordo com a polaridade usada, segundo Modenesi (2004), quando em CCEN a queda de tensão na região catódica é cerca de 5 a 6 V, enquanto para CCEP, de acordo com Scotti (2014), é de 5 a 20 V (Fig. 2.10). Essa diferença é bastante significativa e demonstra uma maior facilidade de emissão de elétrons pelo efeito termiônico (CCEN) do que pelo efeito de campo (CCEP). Vale ressaltar que para os eletrodos consumíveis, as quedas de tensões catódica e anódica mantêm-se praticamente inalteradas (Fig. 2.11), independente da polaridade usada, pois o mecanismo de emissão de elétrons continua o mesmo.

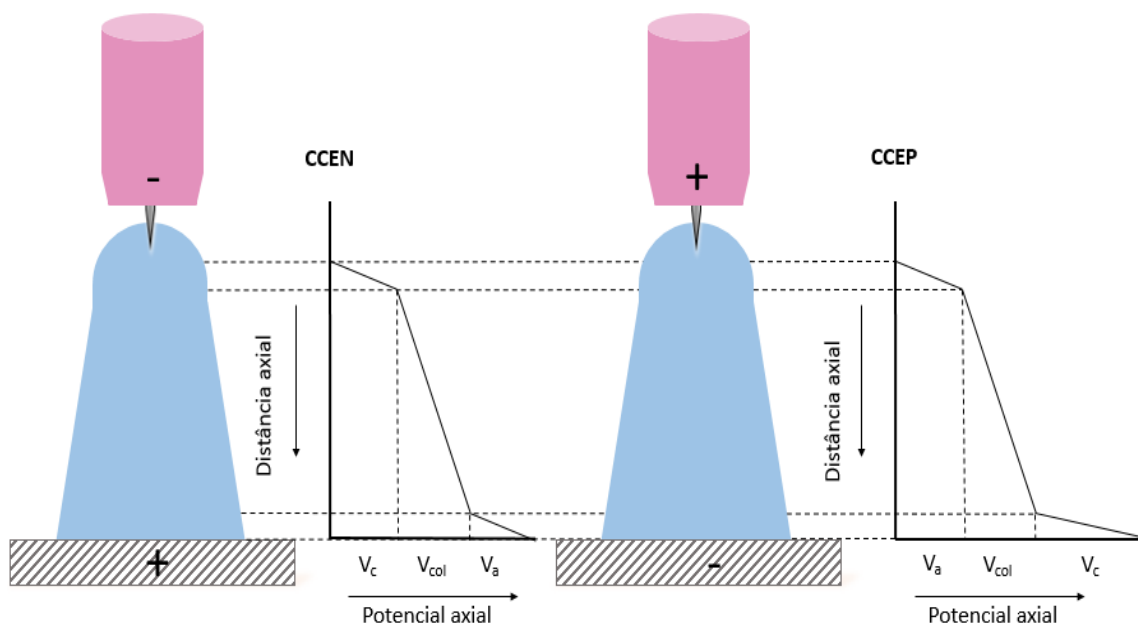


Figura 2.10 - Distribuição da tensão ao longo do arco elétrico-TIG. Fonte: O autor

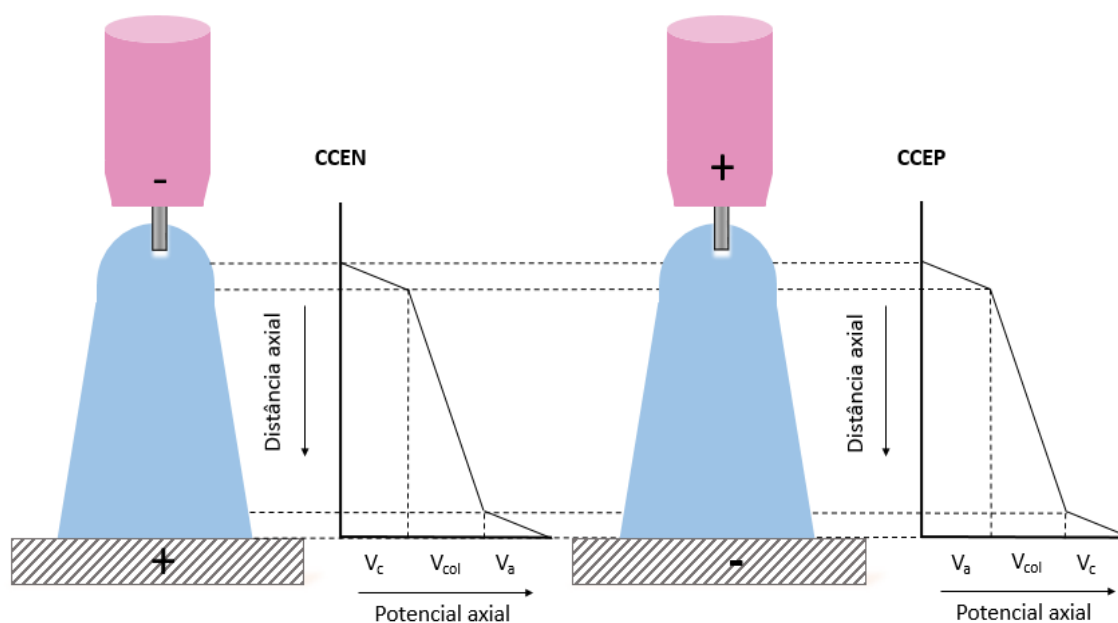


Figura 2.11 - Distribuição da tensão ao longo do arco elétrico-GMAW. Fonte: O autor

No caso do eletrodo não consumível (usualmente de tungstênio), a queda anódica vai ser a mesma (na faixa de 2 a 8 V conforme Scotti, 2014) tanto faz onde o ânodo está localizado, no eletrodo de tungstênio (polaridade CCEP) ou na peça (polaridade CCEN), pois a principal função do ânodo é absorver os elétrons, o que anula o fator do material do ânodo, desde ele seja condutor.

À vista do que foi oposto, pode-se assumir que a tensão ao longo de todo o arco é a soma das tensões em cada em região, ou seja, para uma dada corrente temos que:

$$V = (V_c + V_a) + E * l_a \quad (9)$$

Onde,  $V_c$  e  $V_a$  são, respectivamente, as quedas de tensões catódica e anódica,  $E$  é o campo elétrico e  $l_a$  o comprimento da coluna de plasma.

As quedas de potenciais nas extremidades do arco são independentes do comprimento do arco e variam pouco com a corrente, mas sofrem influência do material e da temperatura. Por sua vez, o campo elétrico depende de vários fatores, destacando-se a composição do gás de proteção, sendo que, de acordo com Modenesi e Bracarense (2004) , para o arco TIG,  $E$  vale entre 0,6 e 1 V/mm para o argônio e 1,5 a 2,0 V/mm para o hélio.

#### **2.4.2 Modelo Físico**

O gás ou vapores metálicos presentes na coluna de plasma estão ionizados e em equilíbrio, ou seja, com as mesmas quantidades de cátions, ânions e elétrons. Mas, devido à alta energia térmica da coluna de plasma, há uma troca de calor com o meio ambiente, principalmente por radiação e convecção com a atmosfera e com o metal de base, resultando na desionização da coluna. Portanto, para manter o estado energético é necessário que calor seja sempre adicionado. Esse acréscimo de calor é resultado do próprio fluxo de elétrons que se chocam com os átomos e transferem para eles a energia necessária para a sua ionização. Observa-se que para isso ocorrer é necessário que os elétrons tenham energia suficiente e que os átomos com poucos elétrons, como o hélio, demandam mais energia que átomos como o argônio para liberarem seus elétrons, o que justifica as diferenças nas tensões específicas citadas no último parágrafo.

A geometria da coluna de plasma também tem uma influência sobre a sua tensão, de modo que ao aumentar o comprimento da coluna do arco, tem-se que:

- Se a resistência específica se mantiver constante, a queda de tensão na coluna deveria crescer de forma linear;
- A área de troca de calor com o meio ambiente aumenta, promovendo a desionização e dificultando a passagem de corrente, aumentando a resistência específica (a queda de tensão na coluna aumenta de forma não-linear);
- As áreas das seções transversais do arco tornam-se maiores, resultando numa menor densidade de corrente e, por consequência, numa menor probabilidade de choques dos elétrons que promovem a reionização, aumentando a resistência específica (a queda de tensão na coluna aumenta de forma não-linear);

Embora as análises anteriores deem uma boa ideia dos eventos presentes na coluna de plasma, elas ainda não são capazes de explicitar a relação entre a queda de tensão no arco e o seu comprimento, mas análises empíricas mostram que esta relação é, normalmente, linear (Fig.2.12).

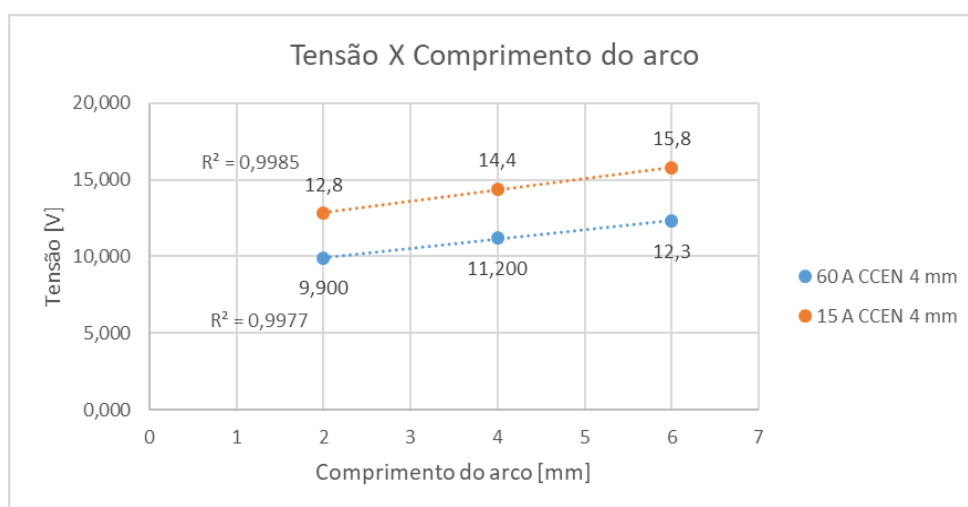


Figura 2.12 - Tensão do arco vs seu comprimento. Fonte: O autor

Em vista do que foi exposto, conclui-se que valores mais elevados de tensão são encontrados em arcos longos, com elevado potencial de ionização e alta condutividade térmica.

Como já foi dito, o volume do arco é quase todo representado pela coluna de plasma (1-10 mm), enquanto a região catódica e anódica possuem cerca de  $10^{-4}$  mm e  $10^{-3}$

mm, respectivamente, porém com um campo elétrico estimado para cada uma delas na soldagem TIG polaridade CCEN em cerca de  $10^5$  V/mm e  $10^3$ - $10^4$  V/mm. Na polaridade CCEP, o mecanismo de emissão de elétrons muda e o valor do campo elétrico pode superar os  $10^6$  V/mm na região da mancha catódica.

Para a condição de eletrodo consumível as intensidades dos campos elétricos mudam significativamente, sendo, nessa condição,  $10^2$  V/mm para região catódica e  $10^3$  V/mm para região anódica.

Na soldagem TIG em ambas as polaridades a densidade de corrente na região anódica está entre 10 e  $10^3$  A/mm<sup>2</sup>, ao passo que na mancha catódica, quando elétrons são ejetados por emissão termiônica, está entre 10 e  $10^2$  A/mm<sup>2</sup>, enquanto que na emissão por campo o valor estimado é de  $2 \cdot 10^5$  até  $10^8$  A/mm<sup>2</sup>. Essa diferença existe, pois na polaridade positiva há a formação de múltiplas manchas catódicas microscópicas e de curta duração (1 a  $10^2$  ns [13]) sobre a região que está sendo soldada. Isso resulta em uma densidade de energia muito grande, suficiente para provocar a fusão e rompimento das camadas de óxidos, resultando na limpeza catódica. Para ilustrar esse fenômeno, Cirino (2009) apresenta na Fig. 2.13 uma comparação entre as polaridades CCEN e CCEP, onde fica claro que a área A2 (mancha catódica) é muito menor que a área A1 (mancha anódica). Ressalta-se que a densidade de corrente quase não se altera com o aumento da corrente, pois nesse cenário será a área que aumentará com o incremento da corrente.

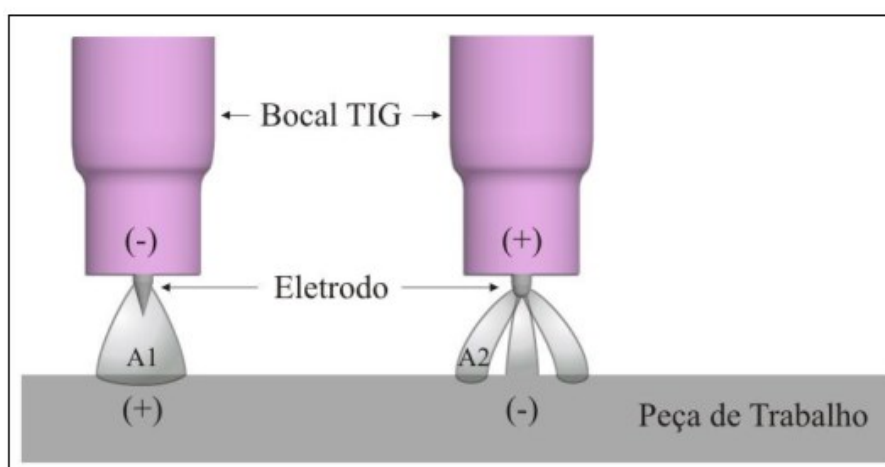


Figura 2.13 - Área de atuação da mancha anódica (A1) e catódica (A2). Fonte: Cirino (2009)

Para o processo GMAW a densidade de corrente média na mancha catódica fica, normalmente, entre  $1 \cdot 10^2$  e  $3 \cdot 10^2$  A/mm<sup>2</sup> e na mancha anódica entre 15 a 30 A/mm<sup>2</sup> e, como no caso anterior, a área, e não a densidade de corrente, irá aumentar com um incremento da corrente.

Embora mais complexo, a grande vantagem do modelo físico é a sua capacidade de propor explicações para a distribuição do calor gerado coluna de plasma e nas regiões catódica e anódica. Sobre esse aspecto, o professor Volodymyr Ponomarov propõem alguns fenômenos físicos que explicariam essa distribuição do calor gerado, por exemplo:

- Processos físicos que favorecem à geração do calor no cátodo:

- Choque de íons (em menor número e energia do que os elétrons em relação ao ânodo);
- Calor do arco, condução e radiação
- Aquecimento por efeito Joule.

- As perdas de energia pelo cátodo são devido a:

- Principalmente condução (refrigeração do eletrodo ou da peça);
- Arrancamento de elétrons (processo endotérmico)
- Energia perdida para evaporar átomos metálicos
- Convecção e radiação de calor para o meio ambiente.

- Processos físicos que favorecem a geração e os ganhos do calor no ânodo:

- A energia fornecida ao ânodo pelos elétrons incidentes, consistindo de:
  - Energia cinética dos elétrons (energia do elétron adquirida no momento da emissão do cátodo e em seguida transferida para o ânodo);
  - Energia térmica do elétron (reação exotérmica quando choca com o ânodo);
- Energia de recombinação de íons na superfície;
- Condução de calor e radiação do arco;
- Aquecimento por efeito Joule.

- As perdas de energia do ânodo são devido a:

- Energia perdida para evaporar átomos metálicos;
- Partículas volumosas expelidas do ânodo ;
- Condução de calor para a chapa ou eletrodo;
- Convecção e radiação de calor para o meio ambiente.

### 3.EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

#### A) Fonte de Energia

O modelo da fonte de energia utilizada durante todos os testes foi a multi-processo IMC-INVERSAL 300 (Fig. 3.1), que em conjunto com os demais equipamentos permitiu a aquisição e análise dos dados que serão apresentados adiante. As características técnicas do equipamento estão destacadas na Tab. 3.1.

*Tabela 3.1 - Dados técnicos da fonte utilizada*

Fabricante	IMC-SOLDAGEM
Modelo	300
Tensão	220, 380 ou 440 V trifásica
Tensão em vazio	56 V
Corrente	Contínua ou alternada
Corrente nominal	300 A
Potência máxima consumida	12 kW
Fator de potência	0,94



*Figura 3.1- Fonte IMC-INVERSAL 300. Fonte: O autor*



## B) Gás de Proteção

O gás de proteção é um consumível usado com o intuito de criar uma atmosfera inerte entre o eletrodo e a peça, evitando o contato do metal fundido e do tungstênio com o ar atmosférico durante a soldagem. Para a realização dos experimentos aqui demonstrados foi empregado o gás argônio comercialmente puro, armazenado em cilindros com reguladores de vazão (Fig. 3.2).



*Figura 3.2 - Cilindros de Argônio (Ar). Fonte: O autor*

## C) Eletrodos

Os eletrodos de tungstênio são classificados como consumíveis de processo, pois, embora não sejam fundidos, sofrem desgaste durante a soldagem, principalmente, quando ligados ao polo positivo da fonte. Neste trabalho foram utilizados eletrodos de tungstênio toriado (2%) de 1,6 e 4 mm de diâmetro afiados à 60° (Fig. 3.3).

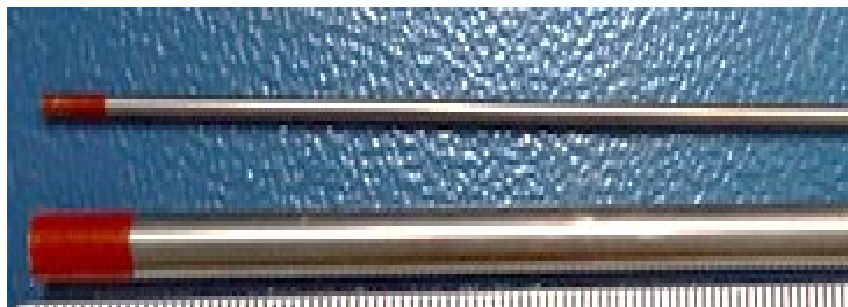


Figura 3.3 - Eletrodos de 1.6 e 4 mm de diâmetro. Fonte: O autor

#### D) Tochas

Dada a grande diferença entre os diâmetros dos eletrodos empregados e para que ambos fossem bem presos pela pinça, foi necessário a utilização de duas tochas TIG automáticas e refrigeradas a água, sendo uma mais adequada ao eletrodo de 1,6 mm e outra mais adequada ao eletrodo de 4 mm (Fig. 3.4).



Figura 3.4- Tochas para os eletrodos de 4 e 1.6 mm. Fonte: O autor

#### E) Bancada de testes

A bancada de testes (Fig. 3.5) foi constituída por uma mesa com movimentos ao longo dos eixos X e Y (não utilizado) e por uma haste móvel que permitia o deslocamento

ao longo do eixo Z. A peça a ser soldada era presa na mesa através do sistema de fixação mostrado na Fig. 3.6, enquanto a tocha de soldagem era acoplada na extremidade da haste. Essa configuração dos equipamentos foi muito importante para a realização dos testes, pois permitiu uma movimentação constante ao longo do eixo X e uma variação do comprimento do arco através do deslocamento vertical da haste móvel. Destaca-se que, originalmente, a bancada de teste foi projetada para ser utilizada durante testes de manufatura aditiva com peça a ser imersa em água e, por isso, tem-se uma mesa estanque.

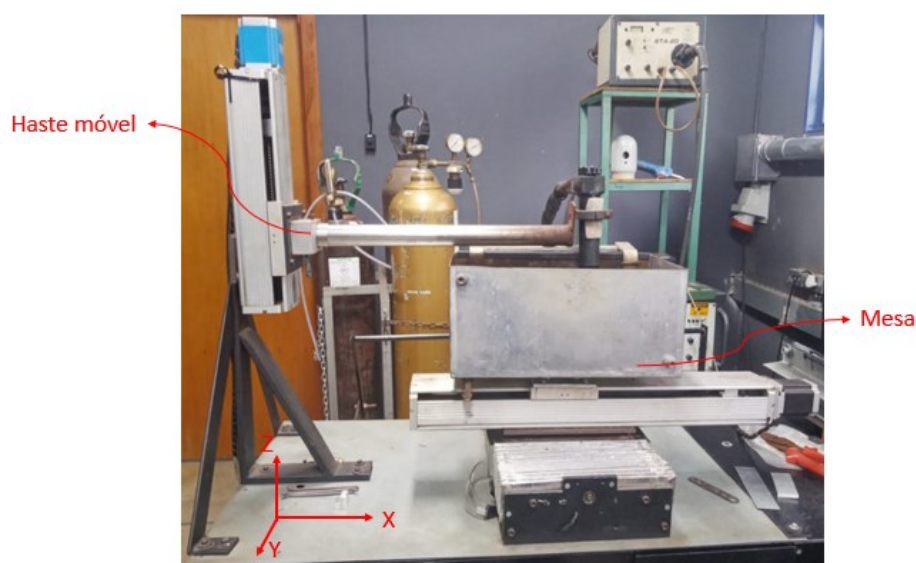


Figura 3.5 - Bancada de teste. Fonte: O autor



Figura 3.6 - Mecanismo de fixação da peça. Fonte: O autor

## F) Sistema de Aquisição de Dados

A corrente entregue pela fonte e a tensão gerada no arco foram captadas graças ao sistema de aquisição utilizado. Nesse sistema a tensão presente no arco foi registrada por meio de um receptor localizado na tocha de soldagem, sendo que o sinal adquirido era primeiro tratado por um condicionador de sinal (Fig. 3.7), depois encaminhado para uma placa de aquisição (Fig. 3.8) e então armazenado no computador por meio do programa labVIEW. O sinal da corrente foi adquirido por meio de um sensor Hall (Fig. 3.9) presente no cabo terra da fonte de soldagem e encaminhado para o condicionador de sinal, depois para a placa de aquisição e finalmente registrado no computador por meio do labVIEW.



Figura 3.7 - Condicionador de sinal. Fonte: O autor



Figura 3.8 - Placa de aquisição. Fonte: O autor



*Figura 3.9 - Sensor Hall. Fonte: O autor*

#### **4.METODOLOGIA**

Com o objetivo de verificar a diferença na tensão do arco no processo TIG entre as polaridades CCEN e CCEP e para avaliar a influência da distância entre o eletrodo e a peça nas tensões encontradas, foram realizadas soldagens em aço inoxidável ferrítico nas correntes de 15 e 60 Amperes, variando a distância entre o eletrodo e a peça em 2 mm a cada 20 s de teste, com uma distância inicial de 2 mm, até um tempo total de 60 segundos. Esse processo ocorreu em uma velocidade horizontal constante de 50 mm/min, porém cada deslocamento vertical da tocha levou em média 2 segundos para ser realizado. Durante todo o tempo a tocha manteve-se perpendicular a peça. A Fig. 4.1 ilustra como esse processo ocorreu e a influência dele sobre o gráfico de tensão, que será melhor avaliado nos capítulos seguintes.

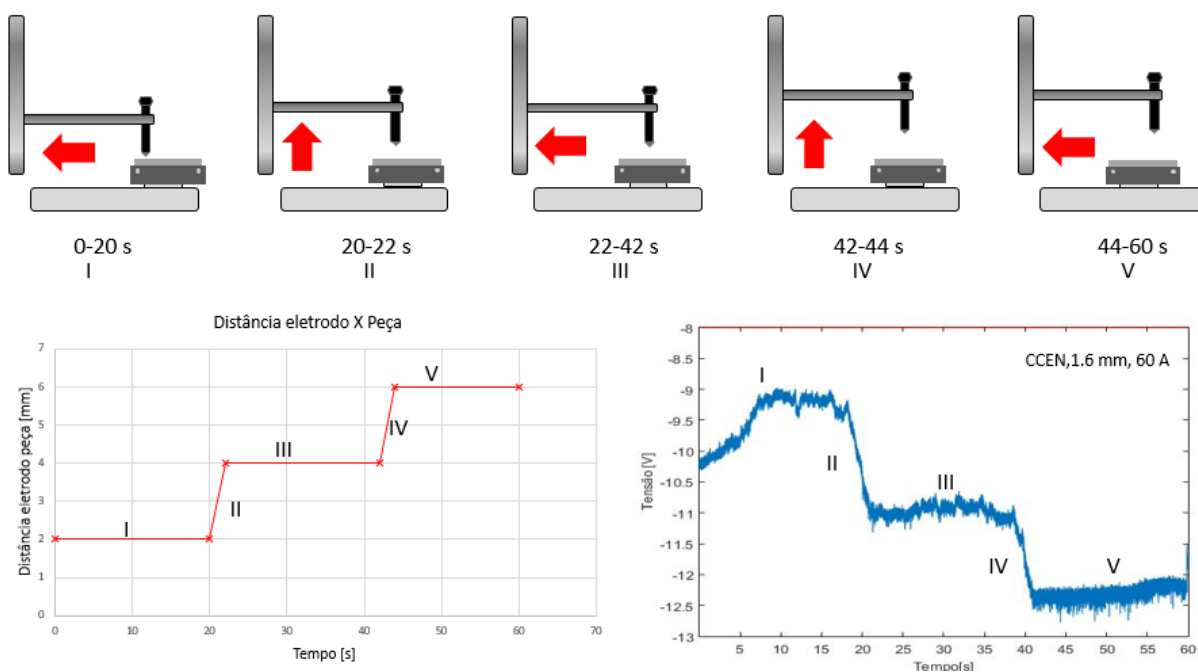


Figura 4.1- Sistema de movimentação utilizado. Fonte: O autor

Essa metodologia foi repetida para os eletrodos de 4 e 1,6 mm, conforme é mostrado na Tab. 5.1

Durante cada teste os parâmetros elétricos de corrente e tensão foram registrados com uma frequência de 1000 Hz.

Para o eletrodo de 4 mm foi utilizado uma vazão de gás argônio de 7 l/min, enquanto para o eletrodo de 1,6 mm foi utilizado uma vazão de 6 l/min. Essa diferença deve-se aos diferentes diâmetros dos bocais utilizados. Ressalta-se que os parâmetros escolhidos não causaram turbulência no fluxo de gás e foram suficientes para proteger a poça de fusão e o eletrodo de tungstênio de contaminações atmosféricas.

Durante os testes os comprimentos dos eletrodos energizados foram de 2 e 2,5 cm para os diâmetros de 1,6 e 4 mm respectivamente. Essa disparidade nos valores não compromete os resultados obtidos e tais medidas serão empregadas como parâmetros para mensurar o desgaste sofrido pelo eletrodo de tungstênio durante a soldagem.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores médios das tensões encontradas estão agrupados na Tab. 5.1 e os aspectos físicos de cada cordão de solda estão organizados nas Fig. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. Salienta-se que os valores do comprimento do arco entre parênteses foram estimados como sendo a medida da hipotenusa de um triângulo reto, como ilustrado na Fig. 5.7. Essa estimativa foi feita, pois, diferentemente do arco na polaridade CCEN, na situação CCEP ele é bastante instável, com sua mancha catódica em constantes e bruscos deslocamentos, o que acaba impedindo a associação da distância do eletrodo até a peça com o comprimento real do arco.

Tabela 5.1 - Resultados encontrados

Comprimento do arco [mm]	Diâmetro [mm]	Polaridade	Corrente Atribuída (Medida) [A]	Tensão média do arco [V]	Tensão específica da coluna [V/mm]	Tensão $V_c+V_a$ [V]
2	4	CCEN	60 (62)	9,9	0,6	8,7
4				11,2		8,8
6				12,3		8,7
2(3,0)	4	CCEP	60 (64)	16,5	0,3	15,6
4(5,0)				16,9		15,4
6(8,0)				17,8		15,4
2	1,6	CCEN	60 (62)	9,2	0,8	7,6
4				11,0		7,8
6				12,3		7,5
3(5,0)	1,6	CCEP	15 (18)	18,3	0,3	16,8
5(7,0)				18,6		16,6
7(7,5)				19,0		16,75
2	1,6	CCEN	15 (17)	O arco foi muito instável		
4						
6						
2	4	CCEN	15 (16)	12,8	0,75	11,3
4				14,4		11,4
6				15,8		11,3

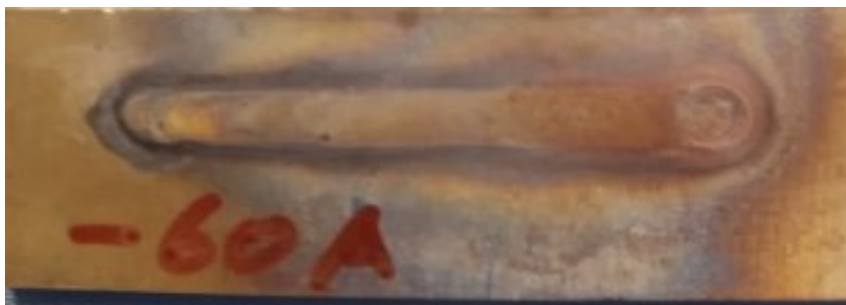


Figura 5.1 - 60 A CCEN 4 mm. Fonte: O autor



Figura 5.2 - 60 A CCEP 4 mm. Fonte: O autor



Figura 5.3 - 60 A CCEN 1,6 mm. Fonte: O autor



Figura 5.4 - 15 A CCEP 1,6 mm. Fonte: O autor



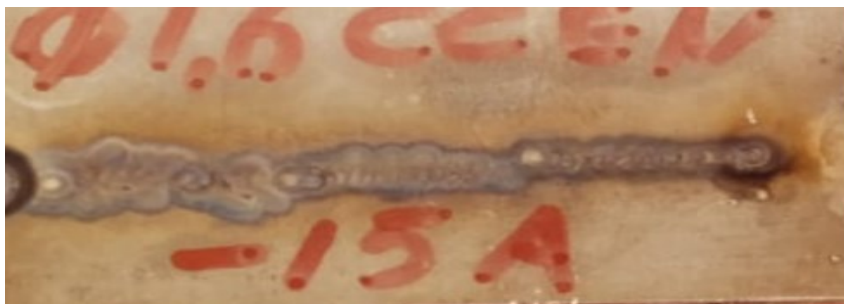


Figura 5.5 - 15 A CCEN 1,6 mm. Fonte: O autor



Figura 5.6 - 15 A CCEN 4 mm. Fonte: O autor

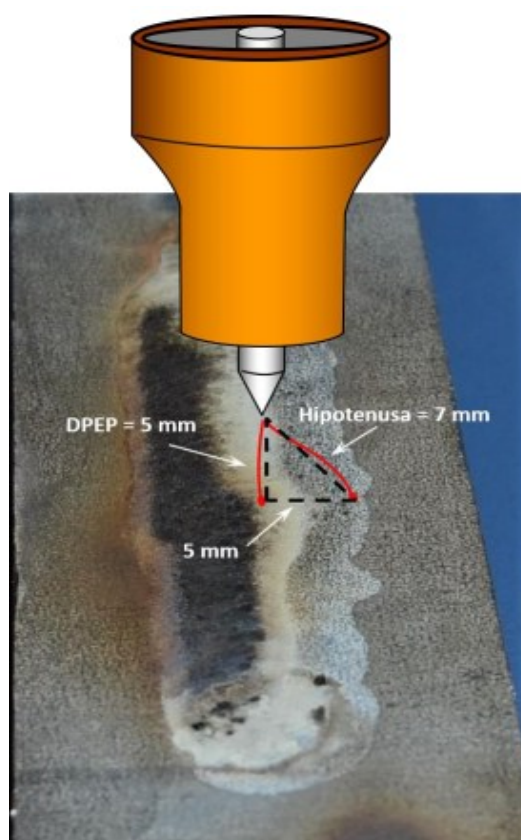


Figura 5.7 - Relação entre a distância eletrodo/peça e o comprimento do arco na polaridade CCEP. Fonte: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

## 5.1 ANÁLISE DAS TENSÕES ELÉTRICAS

### 5.1.1 Comparação I: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm

Conforme mostrado na Tab. 5.1 e na Fig. 5.8, as maiores tensões foram observadas na polaridade CCEP, o que pode ser justificado pela maior dificuldade de extração dos elétrons pelo efeito de campo, o que implica em dizer que mais energia é gasta na polaridade positiva.

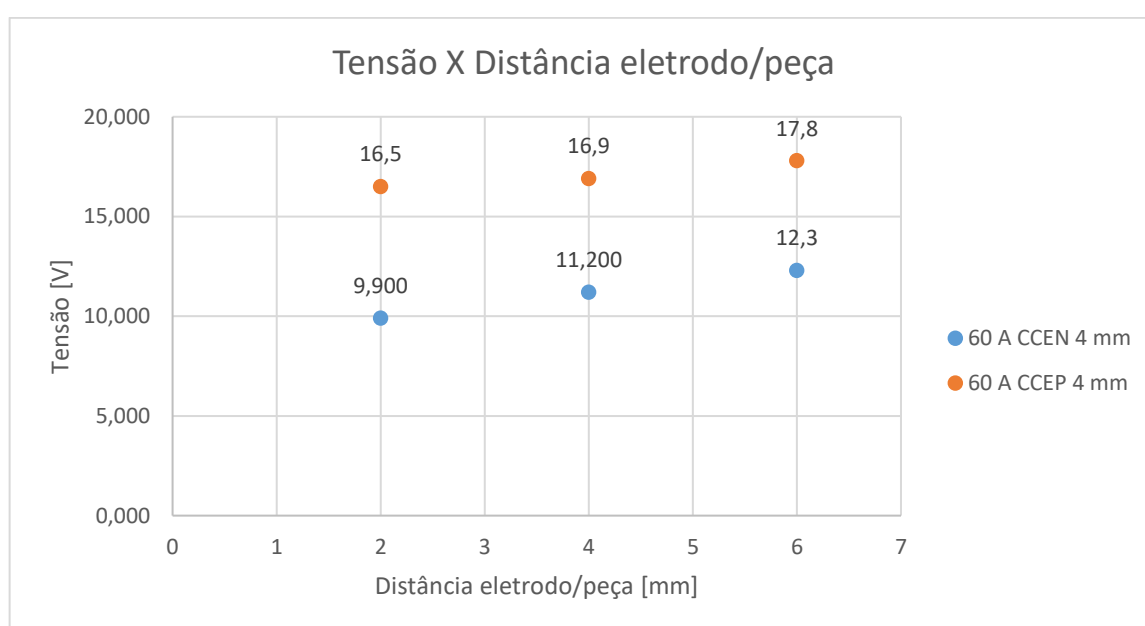


Figura 5.8 - 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm. Fonte: O autor

Observou-se que em ambos os casos ocorreu um aumento da tensão com o aumento da distância eletrodo/peça, porém esse acréscimo de tensão não significa que mais calor está sendo entregue para peça, pois essa adição de calor está acontecendo apenas na coluna do arco e será perdida, quase que por completo, para o meio ambiente, tornando o processo menos eficiente termicamente. Além disso, nota-se que quanto mais comprido o arco, mais largo é o acoplamento arco/peça, porém como o calor presente na conexão arco/peça é o mesmo, menor é a densidade de energia na região e menor será a penetração observada.

Como mostrado nas Figs. 5.1 e 5.2, o cordão de solda é (muito) mais largo na polaridade positiva, graças a movimentação da mancha catódica em busca de pontos

de oxidação, de modo que quanto maior o tempo de soldagem em uma mesma região, mais largo será o cordão de solda devido a procura constante por novos pontos de emissão de elétrons.

Como já era esperado, na polaridade CCEP aconteceu um desgaste mais acentuado do eletrodo de tungstênio, que ocorreu devido ao bombardeamento de elétrons naquela região, pela sua baixa condutividade térmica e por nenhum efeito de resfriamento estar presente.

### 5.1.2 Comparação II: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEN 1,6 mm

Como mostrado na Tab. 5.1 e ressaltado na Fig. 5.9, uma diminuição da tensão ocorreu quando o diâmetro do eletrodo foi reduzido. Tendo em vista que a polaridade utilizada foi a negativa em ambos os casos e que os elétrons foram emitidos por efeito termiônico, pode-se explicar tal redução da tensão com base na Lei de Richard (1), onde a densidade de corrente será maior quanto maior a temperatura e menor a função trabalho. Como o material é o mesmo, a função trabalho é a mesma. A temperatura varia proporcionalmente a resistência elétrica que cada eletrodo proporciona a passagem de elétrons, sendo que a resistência elétrica para essa situação pode ser considerada como:

$$R = \rho * \frac{L}{At} \quad (10)$$

Onde  $\rho$  é a resistividade do material ( $\Omega \cdot m$ ),  $L$  é o comprimento do eletrodo (m) e  $At$  é a sua área transversal ( $m^2$ ).

Sendo  $\rho$  o mesmo para ambos os casos, a resistência irá depender apenas do tamanho do eletrodo e da sua área transversal. Logo, sendo o eletrodo de 1,6 mm de diâmetro muito menor, ele proporcionou uma maior resistência a passagem de elétrons, aqueceu mais facilmente e começou a emitir elétrons com uma menor tensão.

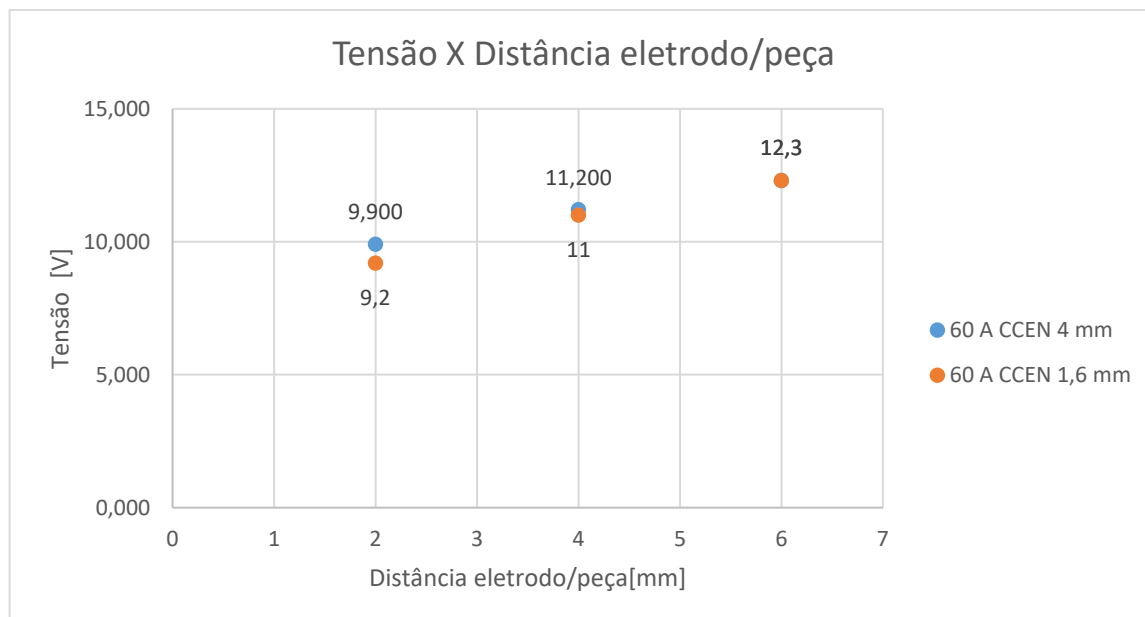


Figura 5.9 - 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEN 1,6 mm. Fonte: O autor

### 5.1.3 Comparação III: 15 A CCEP 1,6 mm X 15 A CCEN 1,6 mm X 60 A CCEN 1,6 mm X 15 A CCEN 4 mm

Analisando a Fig. 5.10 e a Tab. 5.1 percebe-se que, novamente, as maiores tensões foram encontradas na polaridade positiva, indicando que devido a maior dificuldade para emissão de elétrons, mais energia é gasta nessa situação.

Quando se compara as situações com polaridade negativa, verifica-se que foram obtidos menores valores de tensão quando utilizado uma corrente de 60 A. Essa redução da tensão é justificada pelo menor diâmetro do cátodo e pela característica estática do arco (Fig. 5.11), onde um aumento da corrente resulta em um cátodo mais aquecido e num maior grau de ionização do arco, facilitando a emissão de elétrons por efeito termiônico e colaborando com a passagem de corrente elétrica. Para a situação CCEN e 15 A com eletrodo de 1,6 mm o arco foi muito instável e os valores encontrados de tensão foram descartados, mas esperava-se que, devido ao menor volume do eletrodo de tungstênio e a sua maior facilidade de aquecimento, estes valores fossem menores que aqueles encontrados para a situação CCEN, 15 A e eletrodo de 4 mm.

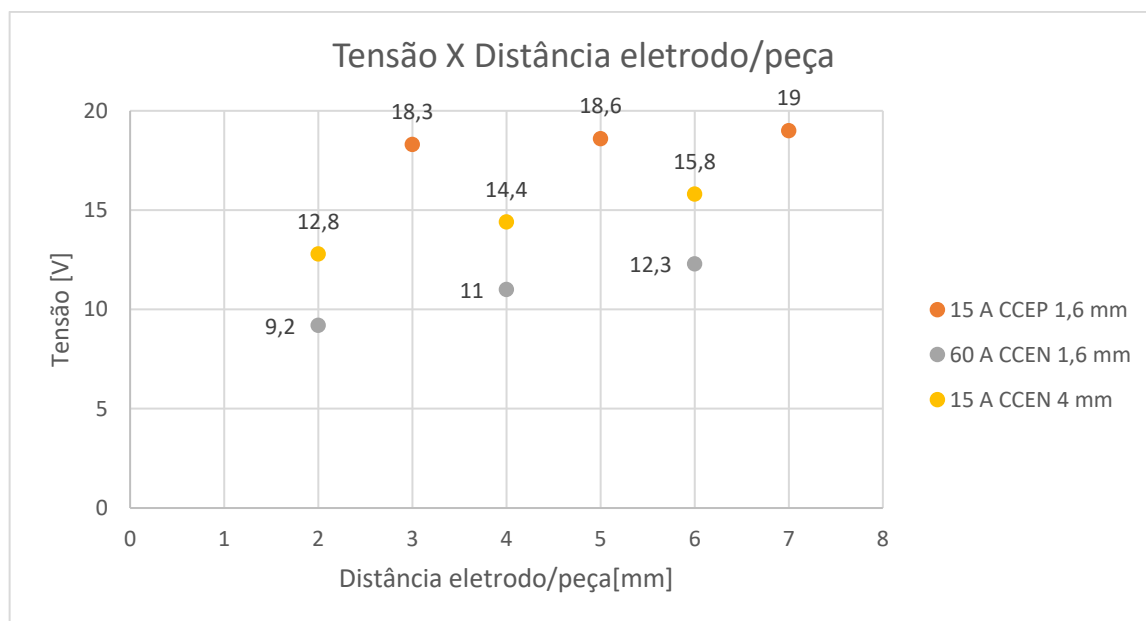


Figura 5.10 - 15 A CCEP 1,6 mm X 15 A CCEN 1,6 mm X 60 A CCEN 1,6 mm X 15 A CCEN 4 mm.  
Fonte: O autor

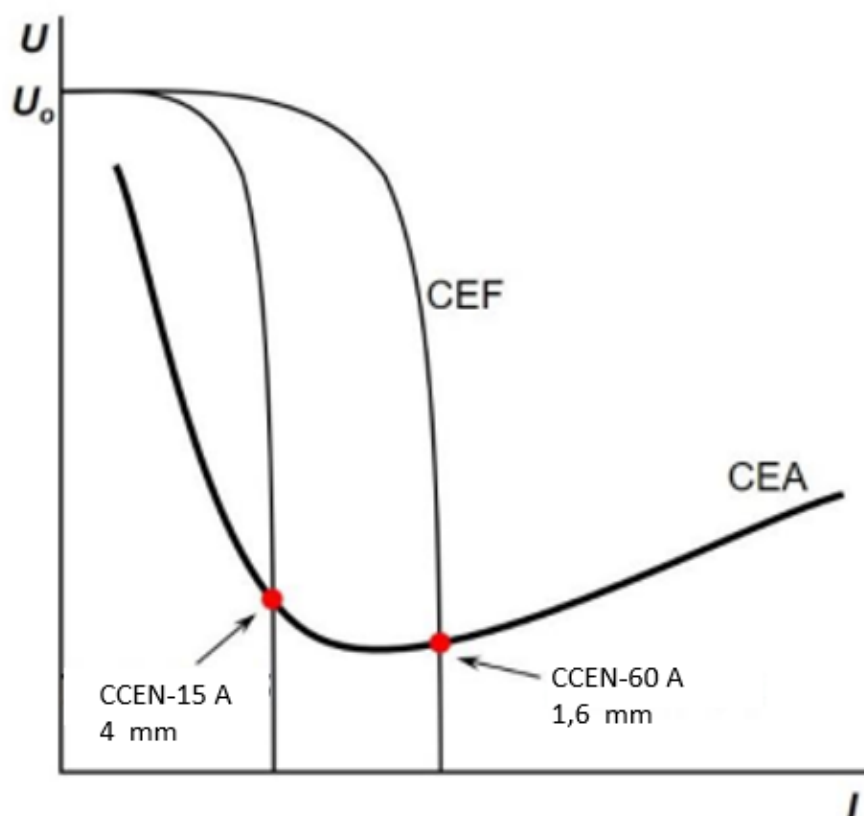


Figura 5.11 - Pontos de trabalho para as situações: CCEN-15 A-4mm e CCEN-60 A-1,6 mm. Fonte: Prof.Dr.Volodymyr Ponomarov (ALTERADO)

#### 5.1.4 Comparação IV: 15 A CCEP 1,6 mm X 60 A CCEP 4 mm

Em ambos os casos, como é mostrado na Tab. 5.1 e na Fig. 5.12, as tensões encontradas foram bastante elevadas quando comparadas aos testes com polaridade negativa. Para os cenários em questão, as menores tensões foram encontradas quando uma corrente de 60 A foi utilizada e a justificativa para isso é muito semelhante àquela do item 5.1.3, quando foi comparado as situações 15 A CCEN 4 mm e 60 A CCEN 1,6 mm, porém com a ressalva que durante a polaridade positiva o mecanismo de emissão de elétrons é por efeito de campo e não por efeito termiônico e que nessa situação o diâmetro do eletrodo de tungstênio não terá influência na tensão encontrada, apenas no seu desgaste. Além disso, ressalta-se que para o eletrodo de 1,6 mm e corrente de 15 A não foi possível abrir o arco com uma distância de 2 mm entre o eletrodo e a peça, sendo necessário alterar esse valor para 3 mm, pois com a distância anterior a área de óxidos disponível não era suficientemente grande para permitir a abertura do arco.

Os tamanhos originais dos eletrodos de 4 e 1,6 mm de diâmetro eram 2,5 e 2,0 cm, porém como é mostrado nas Figs 5.13 e 5.14 houve um maior desgaste da ponta do eletrodo de tungstênio de 1,6 mm, pois o calor presente no mesmo teve maior dificuldade para se propagar graças ao menor volume disponível.

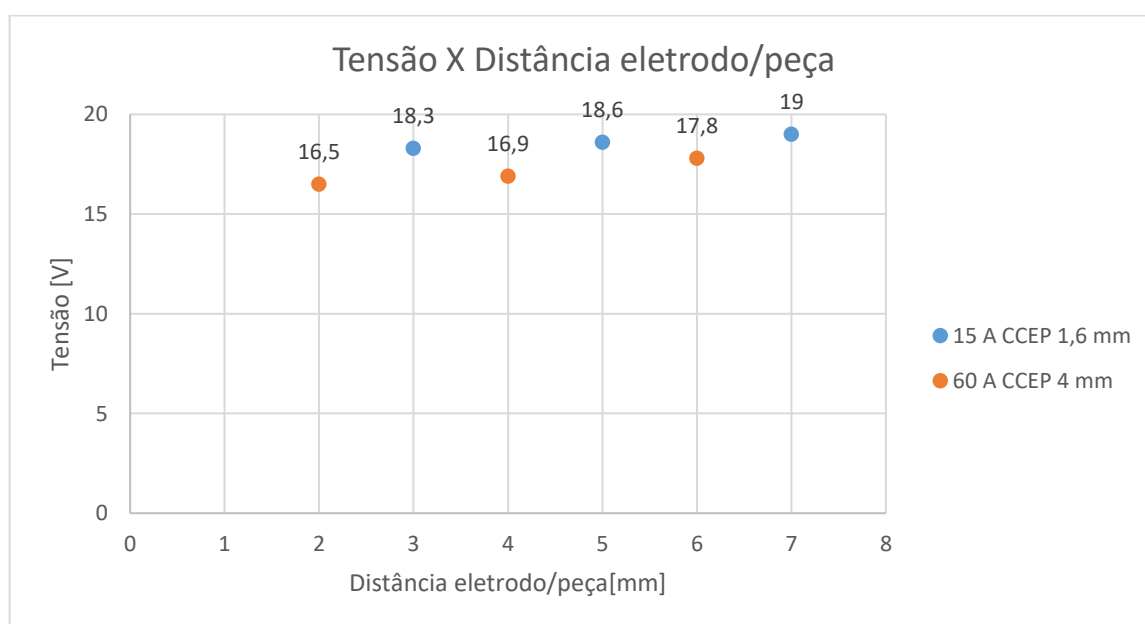


Figura 5.12 - 15 A CCEP 1,6 mm X 60 A CCEP 4 mm. Fonte: O autor



Figura 5.13 - Eletrodo com 4 mm de diâmetro. Fonte: O autor

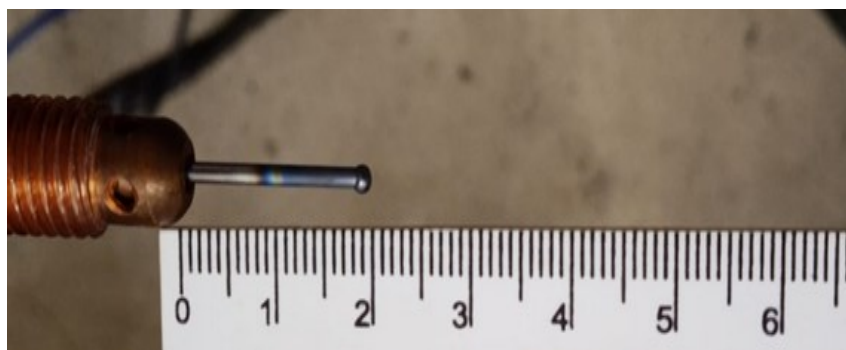


Figura 5.14 - Eletrodo com 1,6 mm de diâmetro. Fonte: O autor

## 5.2 BALANÇO TÉRMICO

Dada a grande complexidade dos fenômenos físicos envolvidos na emissão de elétrons por efeito de campo e termiônico, o balanço térmico aqui apresentado será feito de maneira simplificada, mas bastante confiável, com base nas Equações 6 e 7. Sabendo-se que os valores das tensões medidas estão relacionadas com todo o arco elétrico (região catódica, anódica e coluna de plasma), é razoável considerar que para toda situação cerca de 2 V é relacionado a queda anódica ( $V_a$ ) e que a queda de tensão região catódica ( $V_c$ ) será a diferença entre a tensão medida e as tensões na região de queda anódica e na coluna do arco.

Considerando que a temperatura do arco foi próxima de 8000 K e utilizando as Equações 6 e 7, tem-se que o calor gerado e absorvido no catódica e ânodo são:

$$Q_{Abs. \text{ Cát.}} = I * \left( -\frac{3 * 1,38065 * 10^{-23} * 8000}{2 * 1,6 * 1,0^{-19}} + V_c - \emptyset \right) \quad (11)$$

$$Q_{Abs. \text{ Cát.}} = I * (-1,0 + V_c - \emptyset) \quad (12)$$

$$Q_{Abs. \text{ Ân.}} = I * \left( +\frac{3 * 1,38065 * 10^{-23} * 8000}{2 * 1,6 * 1,0^{-19}} + V_a + \emptyset \right) \quad (13)$$

$$Q_{Abs. \text{ Ân.}} = I * (+1,0 + V_a + \emptyset) \quad (14)$$

### 5.2.1 Comparação: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm

Considerando a função trabalho igual a 4,5 eV para o tungstênio e 4,0 eV para o aço inoxidável ferrítico, distância eletrodo/peça de 4 mm e o valor da tensão específica da coluna como 0,6 V/mm para polaridade CCEN e 0,3 V/mm para polaridade CCEP (Tab. 5.2).

Tabela 5.2 - 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm

Comprimento do arco [mm]	Diâmetro [mm]	Polaridade	Corrente Atribuída (Medida) [A]	Tensão média do arco [V]	Tensão específica da coluna [V/mm]	Tensão $V_c + V_a$ [V]
4	4	CCEN	60 (62)	11,2	0,6	8,8
4 (5,0)	4	CCEP	60 (64)	16,9	0,3	15,4

#### CCEN-Gerado

$$Q_{Ger. \text{ Cát.}} = 62 \text{ A} * (8,8 \text{ V} - 2 \text{ V}) = 421,6 \text{ W}$$

$$Q_{Ger. \text{ Ân.}} = 62 \text{ A} * 2 \text{ V} = 124 \text{ W}$$

$$Q_{Ger. \text{ Col.}} = 62 \text{ A} * 4 \text{ mm} * 0,6 \frac{\text{V}}{\text{mm}} = 148,8 \text{ W}$$

$$\text{Energia Total no Arco} = 694,4 \text{ W} (V_{\text{arco}} = 6,8 + 2,4 + 2 = 11,2 \text{ V})$$



### CCEN-Absorvido

$$Q_{Abs. Cát.} = 62 * (-1,0 + 8,8 V - 2,0 V - 4,50) = \mathbf{80,6 W}$$

$$Q_{Abs. \hat{A}no.} = 62 * (+1,0 + 2 + 4,50) = \mathbf{465 W}$$

$$Q_{Abs. Col.} = 62 A * 4 mm * 0,6 \frac{V}{mm} = \mathbf{148,8 W}$$

$$\mathbf{Energia Total no Arco = 694,4 W} (V_{arco} = 6,8 + 2,4 + 2 = 11,2 V)$$

### CCEP-Gerado

$$Q_{Ger. Cát.} = 64 A * (15,4 V - 2,0 V) = \mathbf{857,6 W}$$

$$Q_{Ger. \hat{A}no.} = 64 A * 2,0 V = \mathbf{128 W}$$

$$Q_{Ger. Col.} = 64 V * 5,0 mm * 0,3 \frac{V}{mm} = \mathbf{96 W}$$

$$\mathbf{Energia Total no Arco = 1081,6 W} (V_{arco} = 13,4 + 1,5 + 2 = 16,9 V)$$

### CCEP-Absorvido

$$Q_{Abs. Cát.} = 64 A * (-1,0 V + 15,4 V - 2 V - 4,0 V) = \mathbf{537,6 W}$$

$$Q_{Abs. \hat{A}no.} = 64 A * (+1,0 V + 2,0 V + 4,0 V) = \mathbf{448 W}$$

$$Q_{Abs. Col.} = 64 V * 5,0 mm * 0,3 \frac{V}{mm} = \mathbf{96 W}$$

$$\mathbf{Energia Total no Arco = 1081,6 W} (V_{arco} = 13,4 + 1,5 + 2 = 16,9 V)$$

A Tab. 5.3 e a Fig. 5.15 correspondem aos valores encontrados na situação proposta e embora as equações utilizadas considerem que o calor gerado na coluna de plasma fique restrita a mesma e, então, é perdido para o meio ambiente pela convecção e radiação, é importante ponderar que uma fração desse calor é transferida, independente da polaridade usada (Modenesi, 2012), para a peça pela convecção do jato de plasma. No entanto, essa estimativa é muito difícil de ser feita, mas foi considerada como 5% para CCEN e 2% para CCEP, resultando nos valores entre parênteses. Outra simplificação das equações utilizadas consiste em não levar em consideração as perdas que ocorrem em cada região do arco, mas que, para o propósito desse trabalho, foram consideradas entre 2-5% na análise feita na Fig. 5.16

Tabela 5.3 - Balanço térmico: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm

	CCEN		CCEP	
	Calor gerado (W / %)	Calor absorvido (W / %)	Calor gerado (W / %)	Calor absorvido (W / %)
Cátodo	421,6 / 60,7	80,6 / 11,6	857,6 / 79,3	537,6(559,2) / 49,7(51,7)
Ânodo	124 / 17,9	465 (499,8) / 67,0 (72,0)	128 / 11,8	448 / 41,4
Coluna	148,8 / 21,4	148,8 (114,0) / 21,4( 16,4)	96,0 / 8,9	96,0 (74,37) / 8,9 (6,9)
Total	694,4 / 100,00	694,4 / 100,00	1081,6 / 100,00	1081,6 / 100,00

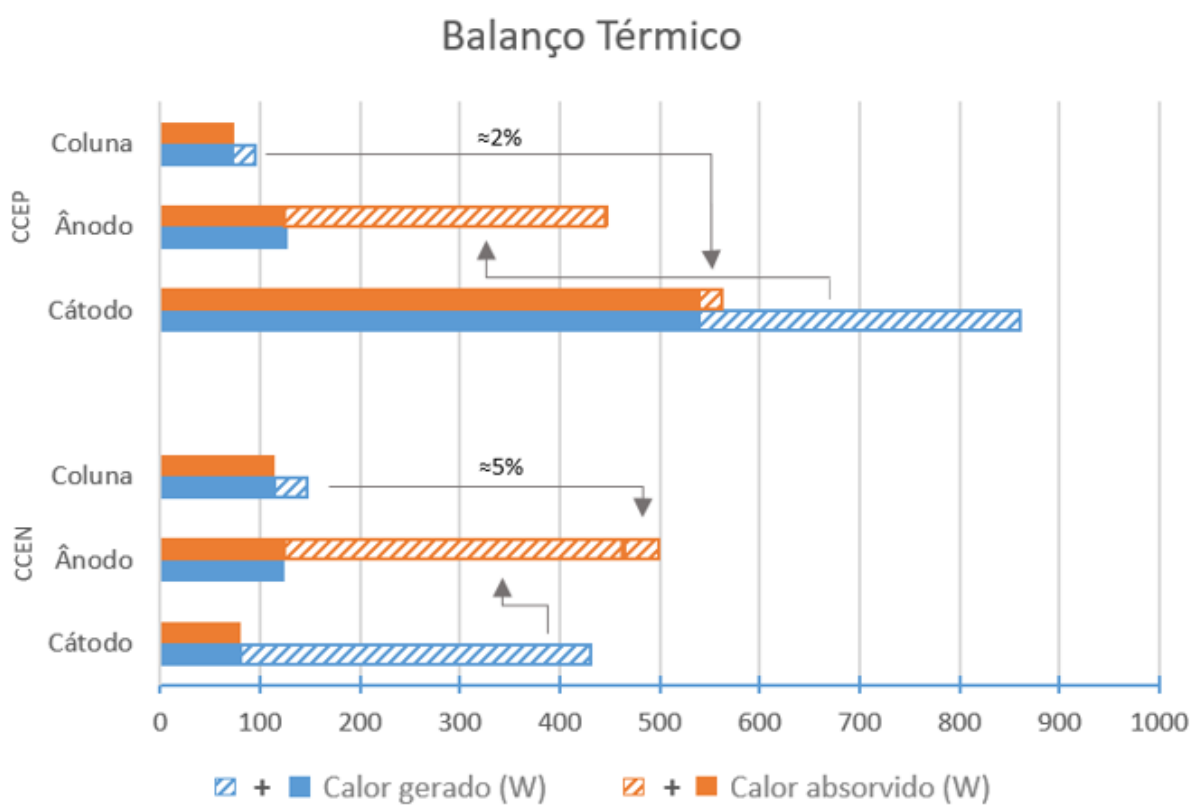


Figura 5.15 - Balanço térmico: 60 A CCEN 4 mm X 60 A CCEP 4 mm. Fonte: O autor

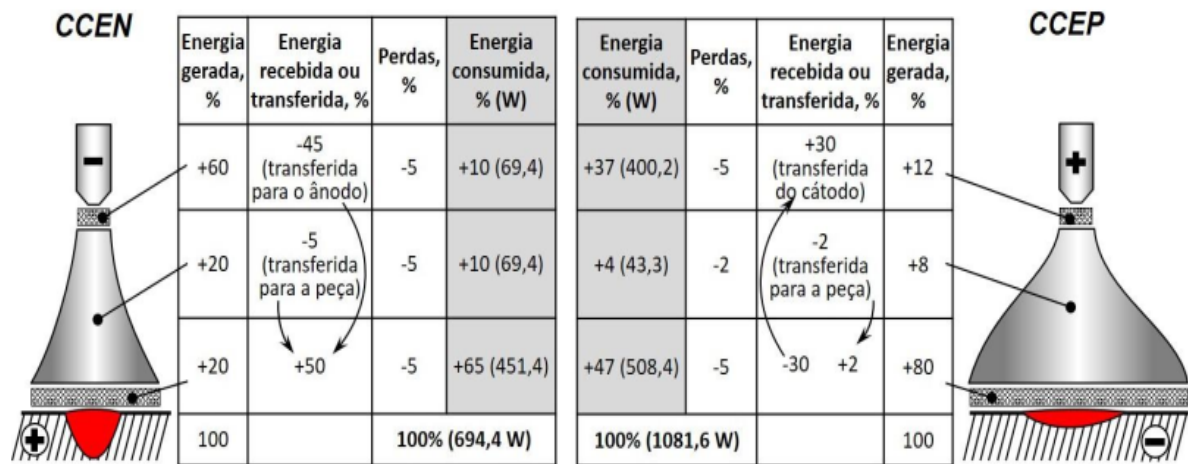


Figura 5.16 - Distribuição do calor ao longo do arco elétrico na soldagem TIG (com eletrodo não consumível), com o comprimento do arco de  $\approx 4$  mm,  $I_s \approx 60$  A, gás de proteção – Argônio.). Fonte: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Com base nos resultados apresentados verifica-se que na polaridade CCEN apenas uma fração do calor gerado no cátodo é mantido no mesmo (cerca de 5 – 6 vezes menos do que é gerado), de sorte que a maior parte desse calor é transferido, por meio de elétrons, para o ânodo que acaba por absorver cerca de 3 - 4 vezes maior calor do que o gerado no mesmo. Essa transferência de calor assegura ao eletrodo de tungstênio um efeito de resfriamento, impedindo o seu o desgaste prematuro e faz com que ocorra o aquecimento e fusão do metal de base.

Na polaridade CCEP, devido a maior queda de tensão catódica resultante da maior dificuldade de emissão de elétrons por efeito de campo, nota-se que há uma maior quantidade de energia envolvida no processo. No entanto, o calor absorvido pela peça permaneceu muito semelhante aquele encontrado na polaridade CCEN, mas com uma área afetada muito maior, o que reduz a densidade de calor na região da peça e faz com que para baixas correntes a poça de fusão nem chegue a ser formar.

Uma das diferenças mais notáveis entre a polaridade CCEP e CCEN está na acelerada deterioração do eletrodo de tungstênio quando ligado ao polo positivo da fonte. Esse fenômeno pode ser explicado ao analisar a Fig. 5.16, que demonstra que quantidade de calor absorvido pelo tungstênio é cerca de 6 vezes maior quando ligado ao polo positivo da fonte. Tal constatação está de acordo com os valores de corrente recomendados para as polaridades CCEN e CCEP (Fig. 5.17)

Diâmetro do eletrodo, mm	Corrente recomendada, A	
	W/Wth (CCEN)	W/Wth (CCEP)
1,6	70 – 150	10 – 20
2,4	150 – 225	15 – 30
3,2	200 – 275	25 – 40
4,0	250 – 350	40 – 55
4,8	300 – 500	55 – 90
6,4	400 – 650	80 – 125
	$-I_s$	$6 - 7 \text{ vezes } > +I_s$

Figura 5.17 - Valores recomendados de corrente para os eletrodos de tungstênio para soldagem TIG nas polaridades CCEP e CCEN. Fonte: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

### 5.3 ANÁLISE DAS CURVAS DE TENSÃO

Os valores de tensão foram captados com uma frequência de 1000 Hz em todos os testes e os gráficos da Fig. 5.18 mostram as curvas de tensão para cada situação.

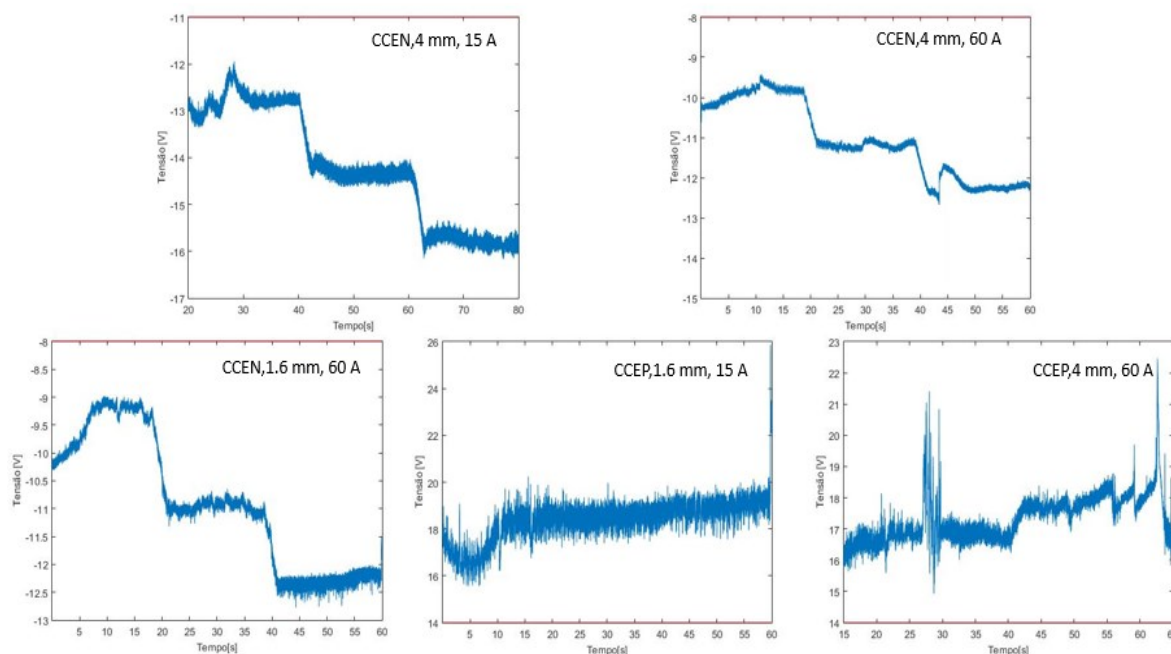


Figura 5.18 - Gráficos das tensões. Fonte: O autor

Quando o tungstênio é o polo negativo da fonte os elétrons são emitidos por efeito termiônico e o arco elétrico possui o formato característico e bem definido de um cone, fazendo com que a relação entre a distância eletrodo/peça e o tamanho da coluna do arco seja bem precisa. Assim sendo, é observado nos gráficos da Fig. 5.18 que o aumento da distância entre o eletrodo e a superfície da peça, na polaridade CCEN, gera um aumento significativo na tensão elétrica do arco.

Por outro lado, quando a peça é o polo negativo da fonte, os elétrons são emitidos por diversas regiões com presença de óxidos (emissão por campo) e a mancha catódica não é mais fixa, movendo-se através de diversos pontos de oxidação e dando ao arco elétrico um formato irregular. Como resultado, o comprimento do arco não está mais relacionado com a distância eletrodo/peça, mas passa a ser representado pela distância entre os pontos de oxidação e o eletrodo de tungstênio, o que explica a pouca variação da tensão na polaridade CCEP ao longo das distâncias de 2, 4 e 6 mm

Outra característica das curvas de tensão na polaridade CCEP é, como constatado nos gráficos das Fig. 5.19 e 5.20, a maior oscilação dos valores de tensão em torno de um valor médio. Essa característica é resultado da movimentação da mancha catódica através de vários pontos de oxidação e das diferentes distâncias entre eles e o eletrodo de tungstênio.

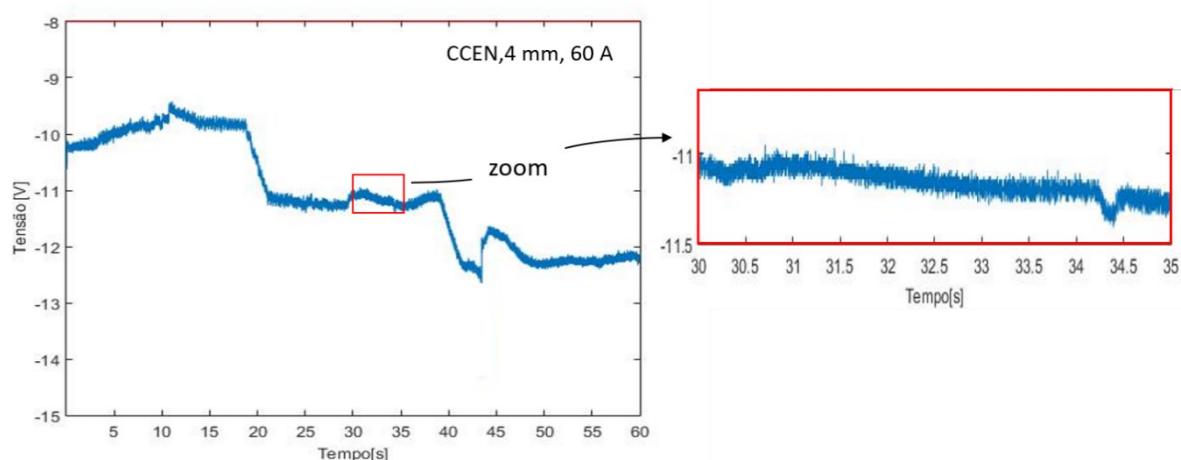


Figura 5.19 - CCEN, 4 mm, 60 A. Fonte: O autor

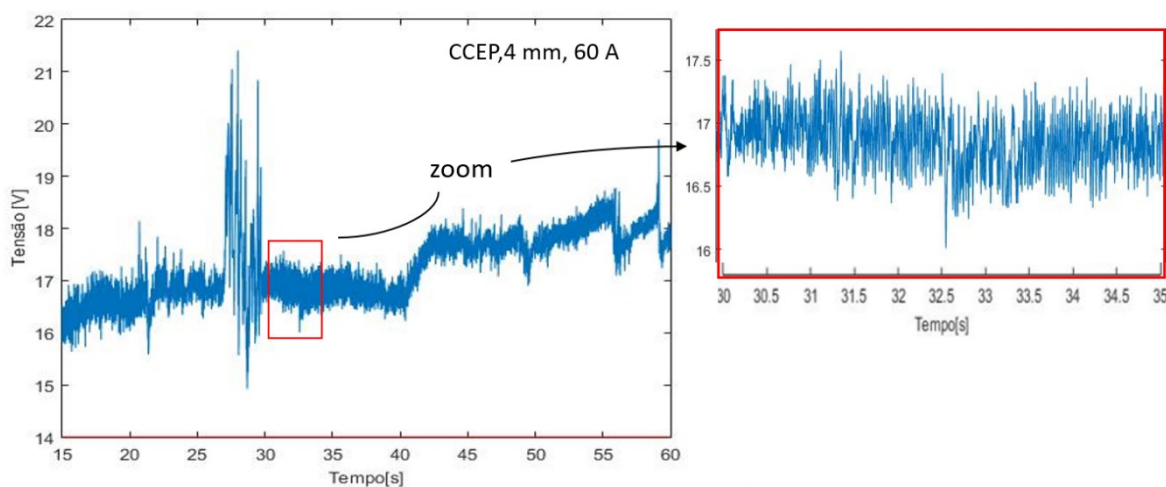


Figura 5.20 - CCEP, 4 mm, 60 A. Fonte: O autor

## 6.CONCLUSÕES

Os resultados genéricos encontrados nesse trabalho mostram que, de fato, há na soldagem TIG uma maior queda de tensão na região catódica quando o material de base é conectado ao polo negativo da fonte.

Também foi estabelecido que na polaridade CCEP a movimentação da mancha catódica é responsável por gerar um arco elétrico menos estável e, portanto, com maiores variações de tensão em torno de um valor médio.

Notou-se que na polaridade CCEP o comprimento do arco não está diretamente relacionado com a distância eletrodo/peça, mas que ele depende das distâncias entre os pontos de oxidação e o eletrodo.

Com a análise do balanço térmico constatou-se que na polaridade CCEN muito calor é gerado no cátodo, cerca de 60%, mas que apenas fração dele é absorvido pelo mesmo, sendo o restante levado pelos elétrons em direção ao ânodo ou perdido para o ambiente. Para a situação CCEP, uma quantidade ainda maior de calor é gerada no cátodo, algo próximo de 80%, mas que devido as perdas para o ambiente e ao transporte de calor dos elétrons em direção ao eletrodo de tungstênio, a quantidade de calor absorvida pela peça acaba sendo muito semelhante àquela encontrada na

polaridade CCEN, porém como a área afetada é muito maior a densidade de energia imposta na peça acaba sendo menor, resultando em cordões de solda mais largos e menos profundos.

A literatura corrente [7-9] propõe que na polaridade CCEN cerca de 60-70 % do calor gerado é absorvido pela peça e, de fato, algo próximo disso foi observado através dos experimentos realizados. No entanto, as mesmas fontes propõem que na situação CCEP cerca de 30-40 % do calor gerado fica no metal de base, algo que não foi encontrado, uma que vez ao inverter-se as polaridades os fenômenos de emissão de elétrons não se mantêm, pelo contrário, eles mudam drasticamente.

Por fim, foi verificado que a utilização da polaridade CCEP resulta em um desgaste mais acentuado da ponta do eletrodo de tungstênio, pois nesse cenário há mais calor sendo absorvido pelo mesmo e nenhum efeito de resfriamento está presente.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIRINO, L. M. **Estudo dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos processos TIG e MIG/MAG**. Florianópolis: [s.n.], 2009.
- [2] FUERSCHBACH, P. W. Cathodic Cleaning and Heat Input in Variable Polarity Plasma. **Welding Journal**, Fevereiro 1998. 76-85.
- [3] LEITE, P. H. R. **INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO INVERTIDA DA TENSÃO E CORRENTE NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**. Uberlândia: [s.n.], 2018.
- [4] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.
- [5] MODENESI, P. J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Belo Horizonte: [s.n.], 2009. il.color.
- [6] MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico- Soldagem I**. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.
- [7] THAKUR, P.P. and CHAPGAON, A.N. (2016) **A Review on Effects of GTAW Process Parameters on Weld**. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), vol.4, Janeiro 2016, 136-140.
- [8] MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte: [s.n.], 2004.
- [9] NORRISH, J. **Advanced welding process**. 1. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [10] YARMUCH, M. A. R.; PATCHETT, B. M. Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum. **Welding Journal**, Julho 2007. 196-200.
- [11] LANCASTER, J. F. The Electric Arc in Welding. In: LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2. ed. University of Michigan: Pergamon, 1986. Cap. 6.
- [12] SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **“Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho”**. São Paulo, Artliber Editora, 288 p., 2014.
- [13] Jütner, B. (1987) Characterization of the Cathode Spot, **IEEE Trans. on Plasma Science**, PS-15(5), Oct., p. 474, 479.
- [14] COBINE, J.D. **Gaseous Conductors**. McGraw-Hill, 1941