

**ESTUDO SOBRE A ABERTURA E
ESTABILIDADE DO ARCO MIG
NA SOLDAGEM DO ALUMÍNIO.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

**ESTUDO SOBRE A ABERTURA E ESTABILIDADE DO ARCO MIG
NA SOLDAGEM DO ALUMÍNIO.**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE
FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

TÚLIO FERNANDES DOS SANTOS

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2000

ESTUDO SOBRE A ABERTURA E ESTABILIDADE DO ARCO MIG
NA SOLDAGEM DO ALUMÍNIO.

TÚLIO FERNANDES DOS SANTOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. - Orientador

Prof. Júlio César Passos, Dr. – Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Augusto José de Almeida Buschinelli, Dr. Ing. -Presidente

Prof. Berend Snoeijer, Dr. Ing.

Eng. Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Dr. Eng.

O raciocínio estratégico, afinal, é um processo de adivinhação educada. Não é nem ciência nem arte; talvez seja uma arte científica ou uma ciência artística. Não há verdade de inspiração divina que se possa descobrir para se traçar destino de qualquer empresa. Há apenas o conceito mais elucidado para o sucesso que é possível com a aplicação das informações, energia e talento às questões. Requer um certo grau de humildade, uma disposição para questionar suas próprias certezas e, no mesmo tempo, disposição para assumir integralmente o compromisso com uma causa comum e levá-la em frente.

Karl Albrecht

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado do comprometimento de duas universidades e uma empresa, para com o desenvolvimento tecnológico e científico brasileiro, sendo estas:

- PUCPR;
- LABSOLDA da UFSC;
- IMC, Engenharia de soldagem Instrumentação e Automação LTDA;

A participação destas entidades se fez, não somente através de recursos físicos, financeiros e materiais, mas, pelo empenho de vários profissionais ao longo de todo o trabalho. Por esta dedicação, ficam registrados, os mais sinceros agradecimentos à estes profissionais, em especial à:

Prof. Jair Carlos Dutra;
Carlos Eduardo Iconomos Baixo;
Daniel Dipp;
Erwin W. Teichmann;
Larry Ollé;
Paulo Tancredo;
Raul Gohr Jr.;

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	01
2. JUSTIFICATIVA E FUNDAMENTAÇÃO DO TRABALHO	02
3. OBJETIVOS	04
4. ANÁLISE DOS ASPECTOS DO PROCESSO MIG ALUMÍNIO	05
5. MÉTODOS E MATERIAIS	16
5.1. MÉTODOS E MATERIAIS PARA ESTUDO DA ABERTURA DO ARCO.....	17
5.2. MÉTODOS E MATERIAIS PARA DETERMINAÇÃO BÁSICA DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS ADEQUADAS À CORRENTE PULSADA	22
5.2.1. MÉTODOS E MATERIAIS PARA ESTUDO DA CORRENTE DE TRANSIÇÃO	22
5.2.2. MÉTODOS E MATERIAIS PARA ESTUDO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA	24
5.3. MÉTODOS E MATERIAIS PARA DESENVOLVIMENTO DE CONTROLE SINÉRGICO DA ALTURA DE ARCO	26
6. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS	28
6.1. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS DE ABERTURA DO ARCO	28
6.2. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO BÁSICA DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS ADEQUADAS À CORRENTE PULSADA	38
6.2.1. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE TRANSIÇÃO	38
6.2.2. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA	40
6.3. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA CONTROLE SINÉRGICO DA ALTURA DO ARCO	48
7. CONCLUSÕES	53
7.1. CONCLUSÕES SOBRE A ABERTURA DO ARCO	53
7.2. CONCLUSÕES SOBRE OS PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA	53
7.3. CONCLUSÕES SOBRE O CONTROLE SINÉRGICO DA ALTURA DO ARCO	53
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
ANEXOS	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1.	Influência da posição de soldagem na porosidade da solda	7
2.	Simulação térmica da influência da geometria da ponta na abertura do arco	8
3.	Oscilograma da tensão, corrente e velocidade do arame com abertura suave	9
4.	Seqüência de imagens e esquema de abertura suave	9
5.	Oscilograma da tensão, corrente e velocidade do arame com abertura brusca	10
6.	Seqüência de imagens e esquema de abertura brusca	10
7.	Tipos de ensaios com variação de distância de tocha	15
8.	Oscilogramas de corrente e tensão de ensaio de abertura de arco	18
9.	Corpo de prova de ensaio de abertura de arco	21
10.	Oscilogramas de tensão e corrente para determinação da corrente de transição	22
11.	Corpo de prova para determinação da corrente de transição	23
12.	Oscilogramas de corrente e tensão para estudo do efeito da corrente de pulso	24
13.	Quadro demonstrativo das influências dos fatores estudados	30
14.	Influência da geometria da ponta no tempo demandado até a abertura do arco	31
15.	Influência da geometria da ponta na energia demandada antes da abertura do arco	31
16.	Influência da geometria da ponta na tensão de base após a abertura	32
17.	Influência da corrente no tempo demandado até a abertura do arco	32
18.	Influência da velocidade de aproximação do arame sobre o tempo demandado até a abertura do arco	33
19.	Influência da corrente e da geometria da ponta do arame sobre o tempo demandado até a abertura do arco	33
20.	Influência da velocidade de aproximação e da geometria da ponta do arame sobre o tempo demandado até a abertura do arco	34
21.	Influência da corrente sobre o tempo demandado até a abertura do arco (acrescidos os ensaios complementares)	36
22.	Influência da geometria da ponta no tempo demandado até a abertura do arco, (acrescidos os ensaios complementares)	36
23.	Corpo de prova do ensaio de abertura sem parada do arame	37

24. Volume modal de gota x corrente média para arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro	39
25. Cordões de solda com corrente de pulso de 160 A	43
26. Cordões de solda com corrente de pulso de 170 A	43
27. Ampliação da região marcada na figura 26	43
28. Cordões de solda com corrente de pulso de 180 A	44
29. Cordões de solda com corrente de pulso de 200 A	44
30. Cordões de solda com corrente de pulso de 220 A	44
31. Cordões de solda com corrente de pulso de 240 A	45
32. Cordões de solda com corrente de pulso de 260 A	45
33. Ampliação da região marcada na figura 32	45
34. Cordões de solda com corrente de pulso de 280 A	46
35. Cordões de solda com corrente de pulso de 300 A	46
36. Ampliação da região marcada na figura 35	46
37. Cordão depositado sobre chapa corrugada, sem controle sinérgico da altura do arco e com imposição de corrente	49
38. Cordão depositado sobre chapa corrugada, sem controle sinérgico da altura do arco e comando misto	49
39. Cordão depositado sobre chapa corrugada, com controle sinérgico da altura do arco, imposição de corrente, com gás argônio	50
40. Cordões depositados em chapa plana, com controle sinérgico de altura do arco, imposição de corrente, gás argônio	51
41. Ampliação da região marcada na Fig. 40	51
42. Cordão depositado sobre chapa corrugada, com controle sinérgico da altura de arco, imposição de corrente e mistura de argônio e oxigênio	52

LISTA DE TABELAS

1. Comparação entre valores calculados e observados para corrente pulsada	13
2. Conjunto principal de experimentos de abertura	19
3. Conjunto de experimentos de abertura com correntes de 140 e 240 A	20
4. Conjunto de experimentos de abertura, variando a geometria da ponta do arame	20
5. Resultados do conjunto principal de experimentos de abertura	28
6. ANOVA do tempo demandado até a abertura do arco.....	29
7. ANOVA da energia demandada antes da abertura do arco	29
8. ANOVA da tensão de base após a abertura	29
9. Resultados dos experimentos complementares de abertura	35
10. Parâmetros de destacamento de gota	38
11. Comparativo entre as equações para corrente média	41
12. Conjunto de parâmetros para corrente pulsada	42
13. Conjunto de parâmetros ajustados para corrente pulsada	42

RESUMO

Na soldagem MIG do alumínio, com corrente imposta e pulsada, tem-se o risco de não ocorrer a abertura do arco, podendo, por consequência, embolar o arame no mecanismo alimentador. Tal risco se deve à boa condutibilidade térmica e elétrica do alumínio e à aleatoriedade do contato do arame-eletrodo com o metal de base. Os resultados deste trabalho indicam que a geometria da ponta do arame é o principal fator de influência na abertura, mas, mesmo na condição mais crítica deste fator, que é a ponta arredondada, a abertura pode ser assegurada com o uso de uma elevada corrente de abertura. A soldagem com corrente pulsada, considerada mais adequada para o alumínio, envolve a difícil determinação do conjunto de parâmetros e variáveis do processo, dentre os quais a corrente de pulso é fundamental. Os experimentos com diferentes níveis de corrente de pulso, para arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro, indicam um melhor acabamento superficial do cordão depositado, e da região próxima a este, quando empregada corrente de pulso entre 160 e 200 A, sendo que, mesmo com deslocamento da tocha no sentido puxando, considerado desfavorável, os resultados são satisfatórios. O equilíbrio entre velocidade de alimentação e velocidade de fusão do arame determina a estabilidade do comprimento do arco, que, não sendo mantida, pode ocasionar fusão do arame-eletrodo com o bico de contato e enrolamento do arame no mecanismo de alimentação, ou o mergulho do arame-eletrodo na poça de fusão, provocando curto-circuito. A estabilidade do comprimento do arco pode ser conseguida através de controle sinérgico da altura do arco, operando pela modulação da frequência de pulsos. O uso da tensão de base como indicador da altura do arco, sob certas condições, não foi eficaz, porém, mesmo sem um funcionamento perfeito, o controle sinérgico apresentou resultados positivos, indicando que a estabilização do comprimento do arco é fundamental para a qualidade da solda MIG com corrente pulsada aplicada ao alumínio.

Palavras-chave: MIG; alumínio; corrente pulsada; corrente de pulso, abertura do arco; comprimento do arco, controle sinérgico.

ABSTRACT

The high thermal and electrical conductivity associated to a disadvantageous wire tip geometry lead to serious arc striking problems, in aluminum pulsed GMAW process. Under these conditions, there is a high possibility of jamming wire at the wire feeder. The results of this work indicate that wire tip geometry is the main influence factor in the arc striking, but that even in the condition more critic of this factor, round point, the arc striking can be guaranteed with the use of a supplying higher short-circuit-current. The pulsed current considered more suitable for the aluminum involves the difficult determination of the pulsing parameters and variables of the process, in which the peak current is fundamental. The experiments with the different levels of peak current to ER4043 wire with 1.2 mm in diameter indicate a better superficial finish of the deposited bead and of the close area to this. When used the peak current between 160 and 200 A_p, even though the displacement of the torch is in the pulling sense, which is considered unfavorable, the results are satisfactory. Wire jamming also occurs when there is an unbalance between wire feed velocity and wire melting rate, leading to arc length instability, short-circuit and meltback. The stability of the arc length can be reached through a synergic control of it, acting through the modulation of the pulse frequency. The use of background voltage as indicator of the arc length, within determined conditions, was not effective, but although it does not have a perfect operation, the synergic control showed positive results, which shows that the stabilization of the arc length is fundamental to the quality of the GMAW with pulsed current applied to aluminum.

Key words: GMAW; aluminum; pulsed current; arc initiation; arc length; synergic control.

1. INTRODUÇÃO

Na soldagem MIG com fontes de característica tipo tensão constante a determinação dos parâmetros e variáveis de soldagem é simples. A abertura do arco não apresenta problemas e sua altura tende a se manter constante ao longo da soldagem, reduzindo riscos de fusão do arame-eletrodo com o bico de contato, evitando também que o arame se embole no mecanismo de alimentação. Apesar deste sistema apresentar facilidade operacional, devido aos aspectos citados, ele não assegura a uniformidade de penetração e o acabamento da solda não é satisfatório, sendo pior para condições com transferência por curto circuito.

No processo MIG com corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, tem-se boa homogeneidade de penetração, devido à corrente média ser constante e um bom acabamento do cordão depositado. Apesar das vantagens técnicas, este processo apresenta diversos problemas operacionais tais como: dificuldade de abertura do arco, complexidade da determinação dos parâmetros e variáveis, instabilidade do comprimento do arco e fusão do arame com o bico de contato, podendo levar o arame a embolar-se no mecanismo de alimentação.

O uso da corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, é viável, porém de difícil operacionalização. Para torná-la mais popular, deve-se buscar soluções para os problemas acima citados, dentre os quais se destaca: a dificuldade de abertura do arco, a estabilização de seu comprimento e a metodologia para seleção de parâmetros e variáveis.

Este trabalho apresenta o estudo da abertura do arco com fontes de corrente constante, enfocando, especificamente a soldagem MIG do alumínio liga 1200 H14 com metal de adição ER4043 com 1,2 mm de diâmetro. Também é apresentada a sistemática usada para a determinação básica dos parâmetros e variáveis a serem usados para a soldagem com corrente pulsada e o desenvolvimento de um controle sinérgico para assegurar a estabilidade do comprimento do arco.

2. JUSTIFICATIVAS E FUNDAMENTAÇÃO DO TRABALHO

Considerando a importância tecnológica do alumínio, e a expansão de seu uso, em especial na área de transporte, faz-se necessário o aprimoramento das técnicas de soldagem deste material.

Diversos problemas tornam o processo de soldagem MIG complexo, quando aplicado ao alumínio, dificultando sua popularização, principalmente pela falta de clareza para a seleção do tipo de fonte e dos parâmetros e variáveis a serem empregados.

Dentre os principais problemas pode-se destacar: a porosidade, a dificuldade de alimentação do arame e a variação de penetração.

A porosidade é causada fundamentalmente pela contaminação de hidrogênio na solda, sendo relevante a influência de fatores como: limpeza, forma do cordão, posição de soldagem e a dimensão e estabilidade do comprimento do arco.

A dificuldade de alimentação é causada por restrições no trajeto do arame e pela baixa resistência mecânica do arame de alumínio, que ao ser empurrado pelo mecanismo do alimentador pode dobrar e embolar no mecanismo.

A variação da penetração é causada pela variação da temperatura da peça, devido à elevada condutibilidade térmica do alumínio, com destaque para um excessivo reforço com pouca penetração no início da soldagem e um rebaixamento do cordão ao longo da soldagem, como consequência do aquecimento do metal de base.

Alguns problemas da soldagem MIG do alumínio estão relacionados ao tipo de característica estática da fonte, que pode ser de tensão constante ou corrente constante.

As fontes de tensão constante, por não limitarem a corrente, asseguram a abertura do arco. A estabilidade do comprimento do arco é satisfatória, não exigindo nenhum sistema de controle e, a seleção de parâmetros e variáveis é simples, envolvendo basicamente a tensão e a velocidade de arame.

Apesar da facilidade operacional, a falta de um controle efetivo sobre a corrente permite a ocorrência de variações na penetração e no acabamento. A uniformidade de penetração não é assegurada pelo fato da corrente não ser constante, sobretudo quando há oscilação na alimentação do arame ou da distância da tocha. O acabamento não é satisfatório, principalmente em condições de transferência por curto circuito.

As fontes com corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, proporcionam maior uniformidade na penetração, um bom acabamento, sendo a melhor solução no tocante à forma da transferência metálica.

Apesar das vantagens técnicas, as fontes de corrente constante implicam em problemas operacionais de abertura do arco, fusão do arame com o bico de contato, instabilidade do comprimento do arco e complexidade para estabelecer os parâmetros e variáveis envolvidas.

A dificuldade de abertura do arco com fontes de corrente constante está relacionada à limitação da corrente imposta pela fonte e a combinação da elevada condutibilidade térmica e elétrica do alumínio com a geometria da ponta do arame.

A fusão do arame com o bico de contato, comum na soldagem com corrente constante, é causada pelo desbalanceamento entre a velocidade de alimentação e de fusão do arame, podendo levar a complicações na alimentação do arame, o qual pode embolar no mecanismo de alimentação.

A instabilidade do comprimento do arco, verificada na soldagem com corrente constante, pode ser causada pela variação da distância da tocha ao metal de base, devido ao manuseio da tocha ou empenamento do metal de base ou pela oscilação na velocidade de alimentação, ou mesmo pelo desbalanceamento entre a velocidade de alimentação e de fusão do arame. Este problema pode afetar, tanto a limpeza como a proteção gasosa, acentuando assim os problemas de porosidade, já críticos para o alumínio.

A complexidade para a determinação dos parâmetros e variáveis adequados à soldagem com corrente imposta e pulsada se deve à diversidade de variáveis interrelacionadas, corrente de pulso, tempo de pulso, corrente de base, tempo de base e velocidade do arame.

Considerando os aspectos técnicos, a soldagem com corrente imposta pulsada é viável, sobretudo pelo bom acabamento resultante deste processo, porém há uma diversidade de problemas operacionais a serem resolvidos, que dificultam seu uso. Estes problemas necessitam ampla investigação e proposição de metodologias para solucioná-los.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho está inserido no contexto de dois laboratórios de soldagem, o LABSOLDA da UFSC e o Laboratório de Soldagem da PUCPR, em parceria com a empresa IMC- Engenharia de Soldagem , instrumentação e automação LTDA.

A tríplice parceria visa ampliar os conhecimentos dos pesquisadores com relação à soldagem MIG do alumínio e agregar aos equipamentos produzidos pela empresa parceira, o desenvolvimento tecnológico obtido.

Em conformidade com o papel das universidades envolvidas, comprometidas com a geração e disseminação de conhecimentos, este trabalho tem por objetivo, melhorar e popularizar a técnica de soldagem MIG com corrente imposta e pulsada, aplicada ao alumínio, através da solução de problemas críticos desta técnica.

Foram estabelecidas três prioridades a serem estudadas neste trabalho: a abertura do arco, a determinação básica de parâmetros e variáveis e a estabilidade do comprimento do arco.

Como as falhas na etapa de abertura do arco comprometem a realização dos ensaios, foi priorizado para este trabalho a estruturação de uma sistemática de controle das variáveis, capaz de assegurar a abertura do arco.

A falta de consenso quanto aos parâmetros e variáveis adequados à soldagem com corrente imposta e pulsada para o alumínio, torna necessário, no conjunto deste trabalho, a identificação dos mesmos para que os experimentos sejam realizados dentro de uma condição operacional correta.

Neste trabalho pretende-se estruturar uma sistemática capaz de garantir a estabilidade do comprimento do arco ao longo da soldagem MIG do alumínio com corrente imposta e pulsada, reduzindo os problemas de porosidade e desequilíbrio entre a velocidade de alimentação e fusão do arame, de forma a reduzir riscos de fusão do arame-eletrodo com o bico de contato e choque do arame-eletrodo com o metal de base, que comprometem a alimentação do arame.

4. ANÁLISE DOS ASPECTOS DO PROCESSO MIG ALUMÍNIO

Enfocando os aspectos relacionados às propriedades físicas do alumínio, P. Ryan [1], apresenta, de forma simples, os problemas inerentes à soldagem MIG do alumínio.

Em seu artigo, Ryan destaca a influência da condutibilidade térmica do alumínio sobre a uniformidade da penetração da solda, além da dificuldade de alimentação do arame, causada pela maciez do alumínio. Comenta, ainda, que a suscetibilidade do material à oxidação pode afetar a qualidade da solda e que os problemas de fusão do arame-eletrodo com o bico de contato são agravados pela baixa temperatura de fusão do alumínio.

Suas considerações, relativas às propriedades do alumínio e às dificuldades inerentes a sua soldagem, são bem apresentadas, mas não envolvem toda a complexidade do processo.

Ryan aponta sugestões práticas para a soldagem, que se resumem em: limpeza do metal de base para remoção da camada oxidada, uso de maiores níveis de corrente e velocidade de soldagem e direcionamento da tocha no sentido empurrando.

A sugestão de utilização de maiores níveis de corrente, combinada com elevadas velocidades de soldagem, deve ser restringida às fontes de tensão constante e transferência por escoamento goticular axial (spray), exigindo, para isto, correntes acima da corrente de transição e conseqüentemente maiores velocidades de deslocamento para reduzir a penetração.

A proposição de que a soldagem MIG do alumínio se dê sempre no sentido empurrando constitui-se numa restrição questionável, devendo ser considerada nos estudos deste trabalho.

O artigo escrito por B. Altshuller [2], resume os principais aspectos relativos à soldagem do alumínio pelo processo MIG, entre os quais se destacam as fontes de soldagem e a relação destas com a estabilidade do arco e a geometria da junta.

Altshuller destaca a importância da característica da fonte para a soldagem MIG do alumínio mostrando as diferenças entre fontes de tensão constante e de corrente constante.

Segundo Altshuller, a principal vantagem das fontes de tensão constante é a estabilidade do comprimento do arco, sendo mantida, mesmo quando há variações na velocidade de alimentação do arame. Isto evita a fusão do arame-eletrodo com o bico de contato. Como principal desvantagem, qualquer variação na velocidade do arame causa mudança na corrente e assim na penetração, o que não é percebido pelo soldador.

Altshuller coloca como principal vantagem das fontes de corrente constante, que a corrente é mantida constante, mesmo com oscilações na velocidade do arame, resultando em uma penetração uniforme. Como desvantagens, a velocidade do arame não deve variar e a abertura do arco é mais difícil, quando comparada às fontes de tensão constante.

O trabalho de Carlos W. P. Azevedo et alii [3], confirma através de experimentos, que a fonte de corrente constante mostrou-se mais adequada que a fonte de tensão constante para a soldagem MIG do alumínio, quando considerados os fatores penetração, e uniformidade do cordão.

Conforme Altshuller, para obtenção de boa limpeza e boa proteção gasosa, de forma a evitar poros, é necessária a estabilidade do arco. A estabilidade do arco está relacionada à uniformidade na velocidade de alimentação do arame, o que não é fácil de ser obtido devido às propriedades físicas do alumínio, principalmente quando se usa alimentador que apenas empurra o arame e longos conduites.

A geometria da junta, segundo Altshuller, deve ser considerada como um fator importante na seleção do tipo de fonte a ser usada, pois fontes de corrente constante, mantêm a uniformidade da penetração. As fontes de tensão constante, ao contrário, não mantêm corrente constante em algumas configurações de juntas, apesar de serem adequadas para determinadas geometrias de junta.

Embora Altshuller não considere em suas análises, existem fontes que combinam as duas características estáticas, para tentar associar as vantagens das fontes de tensão constante e de corrente constante, razão pela qual são denominadas fontes de modo misto. Estas trabalham, geralmente, com corrente pulsada, impondo a corrente no tempo de base e comandando a tensão no tempo de pulso.

O artigo de J. H. Devletian and W. E. Wood [4], sobre porosidade em soldas de alumínio, apresenta como causa principal destas, a contaminação por hidrogênio. Isto se deve ao fato de que a proporção entre a máxima solubilidade de hidrogênio no alumínio líquido superaquecido e a solubilidade do hidrogênio no líquido à temperatura de solidificação é muito maior que para qualquer outro metal estrutural. Comparado a outros metais, pequenas concentrações de hidrogênio na solda de alumínio já podem provocar porosidades.

A principal fonte de hidrogênio no processo MIG são os contaminantes hidrocarbonetos da superfície do arame, principalmente oriundos de lubrificantes do mecanismo de alimentação, que são imediatamente vaporizados no arco e convertidos em hidrogênio atômico, que fica disponível para absorção pela poça fundida.

Segundo Devletian, outros fatores afetam a porosidade na soldagem do alumínio, entre os quais devem ser considerados: a dimensão da poça de fusão, o formato do cordão e a posição de soldagem.

Com relação à dimensão da poça de fusão, quanto maior for a poça, maior será a possibilidade de contaminação, devido à dimensão da superfície exposta.

O formato do cordão, influencia na dinâmica de eliminação dos poros, sendo que, o cordão mais estreito e com reforço tende a aprisionar mais poros, pelo fato de aumentar a distância a ser percorrida pelo hidrogênio até atingir a superfície.

A posição de soldagem, pode favorecer ou dificultar a saída do hidrogênio. Conforme ilustrado na Fig. 1, o caso (a) apresenta a condição mais favorável à saída do hidrogênio.

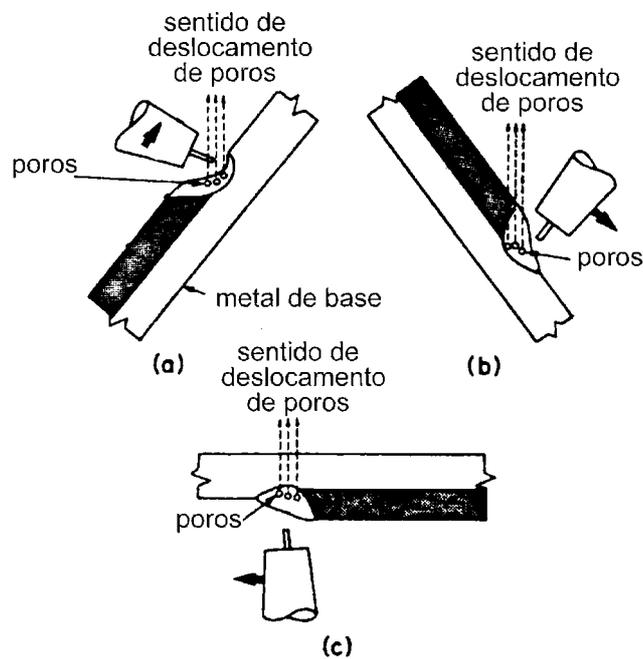


Fig. 1 Influência da posição de soldagem na porosidade da solda [4]

Devletian relaciona a maior absorção de hidrogênio com dois fatores indiretos: corrente de soldagem e comprimento do arco.

A corrente de soldagem, sendo maior, resulta em uma maior área da poça de fusão, aumentando a possibilidade de absorção do hidrogênio.

O comprimento do arco, sendo maior, também produz um aumento na absorção do hidrogênio.

As considerações de Devletian quanto aos problemas de porosidade na soldagem do alumínio, são de grande importância, indicando a necessidade de estabelecer maior controle sobre fatores como altura de arco, tamanho da poça de fusão, geometria do cordão, posição de soldagem e corrente de soldagem.

Quanto aos aspectos envolvidos na abertura do arco, o artigo de D. Farson et alii [5], apresenta um estudo sobre a abertura do arco, analisando a influência da geometria da ponta do arame-eletrodo.

Em seu trabalho, Farson realiza simulações, utilizando modelos matemáticos, que consideram algumas geometrias de contato. Estes modelos permitem identificar, para cada geometria, a região provável do arame onde ocorreria o início da fusão.

O resultado de cada simulação foi verificado através de filmagens, comprovando que: o arame com a ponta cortada, afinada, produz uma abertura no ponto de contato do arame-eletrodo com o metal de base e que o arco cresce progressivamente a partir deste ponto. O arame com a ponta cega permite um melhor contato, provocando uma maior dissipação de calor no ponto de contato e, fazendo com que a região provável para início do arco seja o ponto médio do comprimento do arame-eletrodo (Fig. 2).

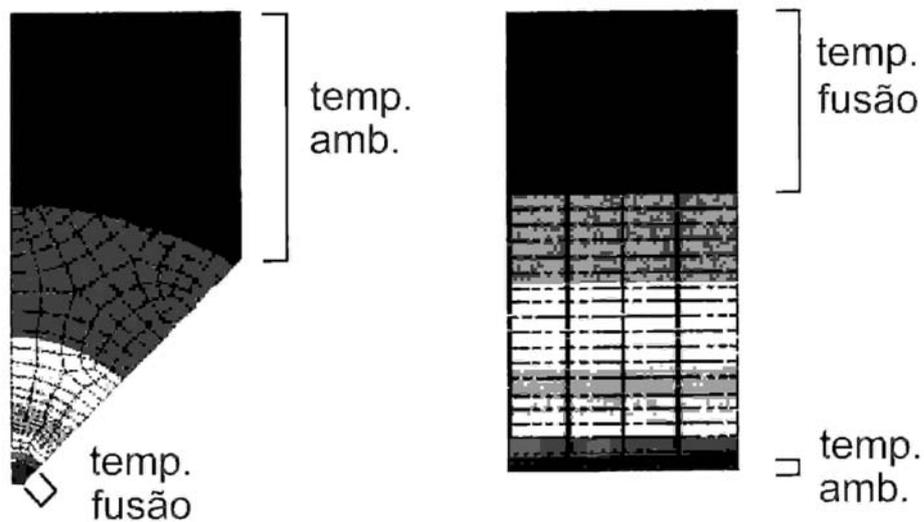


Fig. 2 Simulação térmica da influência da geometria da ponta na abertura do arco [5]

Os experimentos de Farson foram realizados com aço e usada uma fonte de tensão constante.

Com base nos oscilogramas de tensão e corrente, Farson conclui que a abertura a partir do ponto de contato do arame-eletrodo com o metal de base demanda uma menor energia, sendo considerada uma abertura suave.

Conforme suas análises, Farson verifica que a abertura suave é mais provável de ocorrer quando a ponta do arame é cortada, usando-se uma baixa velocidade de aproximação do arame e condições de soldagem, tensão e velocidade de arame, compatíveis com um regime de transferência por curto circuito.

A figura 3 apresenta os oscilogramas da tensão, corrente e velocidade do arame registrados para estas condições, podendo ser observada a abertura seguida de estabilização do arco. A seqüência de imagens correspondente e o esquema ilustrativo, são apresentados na figura 4, onde a abertura do arco, caracterizada pela fusão do arame-eletrodo no ponto de contato com o metal base, quadro A, é seguida da progressão suave do arco, quadros B e C.

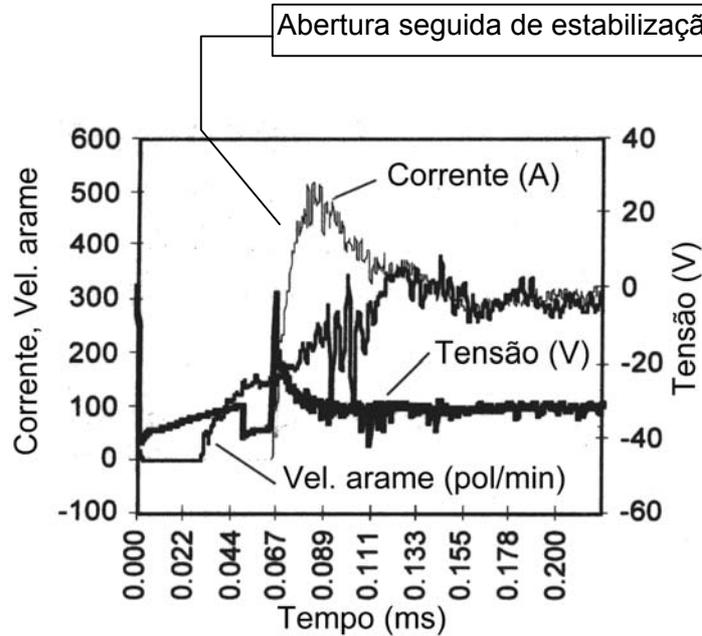


Fig.3 Oscilograma da tensão, corrente e velocidade do arame com abertura suave [5]

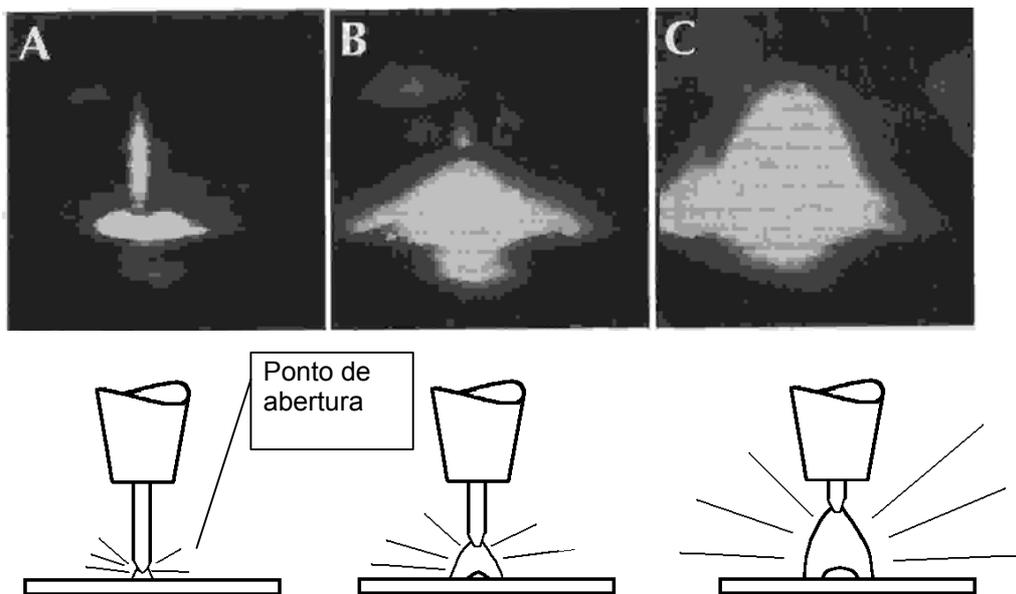


Fig. 4 Seqüência de imagens e esquema de abertura suave [5]

A abertura ocorrida no ponto médio do comprimento do arame-eletrodo demandou uma energia maior, sendo considerada brusca, pela acentuada elevação da corrente. Esta condição favorece a ocorrência da abertura seguida de extinção e nova abertura do arco (Fig. 5). A seqüência de imagens correspondente e o esquema ilustrativo, são apresentados na figura 6, onde a abertura do arco é precedida pelo aquecimento do arame-eletrodo, quadro A, e a fusão deste ocorre próximo ao seu comprimento médio, quadro B, sendo seguida da rápida destruição do arame-eletrodo, quadro C.

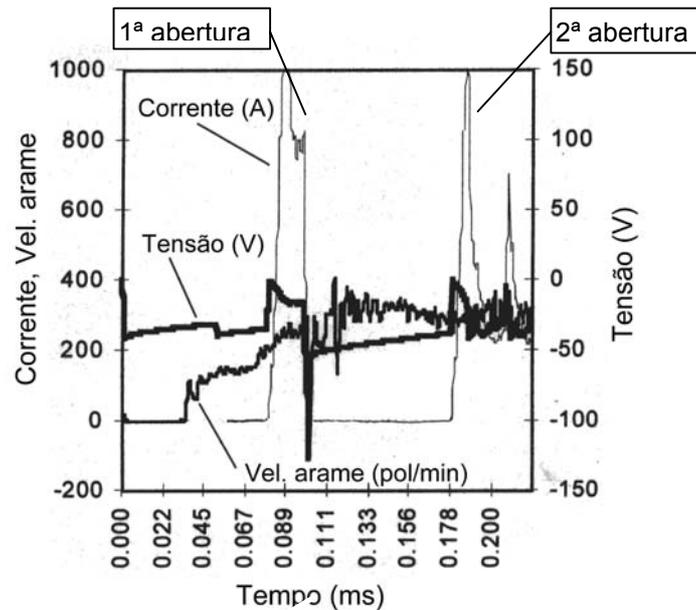


Fig.5 Oscilograma da tensão, corrente e velocidade do arame com abertura brusca [5]

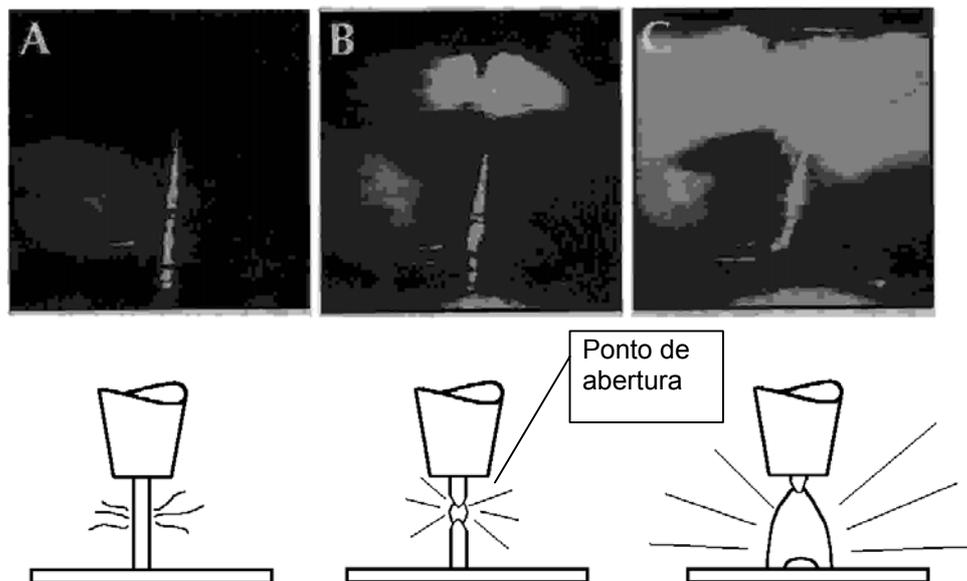


Fig. 6 Seqüência de imagens e esquema de abertura brusca [5]

As considerações de Farson são de fundamental importância para a compreensão do processo de abertura do arco na soldagem MIG, porém os estudos ficaram restritos a sistemas de alimentação que fornecem rampas de velocidade de aproximação de arame e a fontes de tensão constante que não apresentam problemas na abertura do arco.

A determinação de parâmetros e variáveis da corrente pulsada é apresentada por M. Amin [6], tendo como base a igualdade entre a velocidade de alimentação e de fusão do arame, além da condição de destacamento de uma única gota por pulso.

Em seu trabalho, Amin apresenta uma metodologia para a determinação da amplitude e duração da corrente de pulso, de forma a controlar a transferência metálica. Esta metodologia parte da análise das características da transferência natural, obtidas em ensaios com corrente constante.

Para a identificação das características da transferência natural, efetua-se ensaios em corrente constante, combinando o nível da corrente com a velocidade do arame, de forma a resultar em arco estável.

Para cada uma das condições de estabilidade do arco, são identificados, através de oscilogramas, os tempos de destacamento das gotas, sendo representativo o tempo modal de transferência, que é tomado como o período de transferência T .

O período de transferência pode ser relacionado ao volume das gotas e à velocidade de alimentação do arame através da equação:

$$T = \frac{240 * v}{\pi * d_e^2 * V_a} (ms) \quad (1)$$

onde:

v é o volume da gota em mm^3 ;

d_e é o diâmetro do arame em mm;

V_a a velocidade de alimentação do arame em m/min.

Determina-se, a partir da equação 1, o volume modal correspondente a cada condição ensaiada, possibilitando traçar o gráfico que relaciona para cada velocidade de arame, a corrente média e o volume modal das gotas.

É verificado através do gráfico, que para uma dada corrente (corrente de transição) há uma queda brusca do volume modal de gotas, indicando a mudança do tipo de transferência, que passa de globular para escoamento goticular axial.

Para um determinado tamanho de gota, a ser destacado do arame, verifica-se uma única combinação de corrente e tempo de destacamento, que permite estimar o tempo de pulso t_p e a corrente de pulso I_p , sendo o fundamento para a determinação das variáveis da corrente pulsada.

Amin apresenta a relação entre a corrente de pulso e a duração do pulso para um determinado tamanho de gota, através da equação:

$$I_p^{2,3} * t_p \geq D \quad (2)$$

onde D é o parâmetro de destacamento em $A^{2,3}s$, determinado com base na corrente média e no tempo de destacamento, obtidos nos ensaios com corrente constante para o volume de gota determinado.

Na utilização da corrente pulsada há ainda a influência da corrente de base I_b , cuja limitação apresentada por Amin é um valor mínimo c , ou seja:

$$I_b \geq c \quad (3)$$

Este valor mínimo, c , deve assegurar a estabilidade ao arco. Amin sugere que seja aplicada uma margem de segurança, adotando na prática valores acima de 15 A.

A metodologia apresentada por Amin não fornece precisão com relação à determinação de parâmetros e variáveis aplicadas à corrente pulsada, sendo uma orientação básica, necessitando de ajustes para adequação às condições reais de soldagem com corrente pulsada.

O Artigo escrito por S. Subramaniam et alii [7], apresenta um método para a determinação dos parâmetros do MIG pulsado, com base em técnicas estatísticas, composto por cinco fases:

1. Seleção de experimentos;
2. Desenvolvimento de modelo correspondente à taxa de alimentação do arame;
3. Projeto de experimentos otimizado (D-optimal);
4. Identificação das condições de transferência com destacamento de uma gota por pulso (ODPP);
5. Análise e otimização para aplicações específicas.

Os parâmetros considerados no trabalho de Subramaniam, são basicamente:

- Corrente de pulso, I_p , variando entre 250 e 400 A;
- Corrente de base, I_b , variando entre 50 e 150 A;
- Razão cíclica (R_c), caracterizada pela relação:

$$R_c = \frac{t_p}{t_p + t_b} \quad (4);$$

- Frequência dos pulsos, F ;
- Altura de tomada de corrente, h .

A primeira fase, seleção dos parâmetros, consiste na determinação de um projeto experimental fatorial parcial com dois níveis para os parâmetros citados.

A segunda fase, consiste na realização dos experimentos projetados, variando-se a velocidade de alimentação do arame até a obtenção de: um arco estável, um comprimento de arco constante e cordões com qualidade uniforme. É então estabelecido um modelo para a velocidade de alimentação do arame.

Na terceira fase é estruturado e aplicado um projeto experimental otimizado (D-optimal), com três níveis, sendo excluído o parâmetro distância do bico de contato. Este projeto resulta em uma grande redução do número de experimentos, cerca de 19 para o estudo apresentado. O resultado verificado nos experimentos desta fase é o número de gotas destacadas por pulso.

Na quarta fase são identificadas, através de filmagens e oscilogramas, as situações que resultam em destacamento de apenas uma gota por pulso (ODPP), consideradas a princípio como a condição ideal para a transferência no processo MIG com corrente pulsada.

A última fase consiste em estabelecer, através de regressão, as relações entre as variáveis da corrente, I_p , t_p , I_b , t_b , que assegurem o destacamento de apenas uma gota por pulso.

Os experimentos realizados por Subramaniam, foram com arame de adição de alumínio da liga 4047 de 1,2 mm de diâmetro, resultando nos seguintes modelos:

$$V_a = 0,14 * (I_p) + 1,08 * (I_b) + 4,18 * (R_c) + 0,03 * (F) + 0,8 * (h) \quad (5)$$

$$I_p * t_p = -0,0044 * (I_b * t_b)^2 + 2,97 * (I_b * t_b) - 60,13 \quad (6)$$

Considerando que o arame utilizado nos experimentos de Subramaniam foi o ER4047, com 1,2 mm de diâmetro, coincidentemente uma liga da série 4000 de mesmo diâmetro que o utilizado nos ensaios deste trabalho, era de se esperar alguma proximidade para os valores de parâmetros e variáveis.

As equações (5) e (6) aplicadas às condições de correntes de pulso entre 160 e 300 A com corrente média de 70 A, apresentam resultados muito distantes do observado na prática para condições de destacamento de uma gota por pulso. Isto pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1- Comparação entre valores calculados e observados para corrente pulsada

I_p	I_m (A)	$I_p * t_p$ calculado	$I_p * t_p$ observado	V_a (m/min) calculada	V_a (m/min) observada
160	70	427	1040	5,1	3,1
180	70	270	900	4,5	3,1
240	70	30	792	3,9	3,1
300	70	-287	690	3,7	3,1

A diferença observada na tabela acima, se deve ao fato dos experimentos realizados por Subramaniam estarem completamente fora da faixa operacional da corrente pulsada para o material considerado. Nestes experimentos, verifica-se o uso de correntes médias de até 250 A, bem acima da corrente de transição do arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro.

No trabalho de Subramaniam a metodologia estatística para determinação de parâmetros e variáveis da corrente pulsada, apresenta uma grande simplicidade quanto ao número de experimentos, porém os dados apresentados, bem como as equações decorrentes do estudo estatístico destes, não apresentam aplicação prática.

Dutra, J. C. [8], apresenta uma análise de alguns sistemas de controle sinérgico, voltados à soldagem MIG com corrente pulsada:

- Controle sinérgico SINCO;
- Controle sinérgico SINVA;
- Controle sinérgico SINTE;
- Controle sinérgico SINCOEX.

No SINCO, o sistema é alimentado com informações sobre os parâmetros da soldagem: material e diâmetro do eletrodo, além das variáveis de entrada, corrente média, e diâmetro de gota desejados, a partir do que, as variáveis dependentes são calculadas, sendo estas: a velocidade do arame (V_a), a amplitude e duração das correntes de pulso e de base (I_p, t_p, I_b, t_b).

O Controle SINVA, ao contrário do anterior, utiliza a velocidade de arame como uma variável de entrada, a partir da qual, para os parâmetros estabelecidos: material e diâmetro de arame, o sistema identifica a corrente média e as demais variáveis da corrente de pulso e de base (I_p, t_p, I_b, t_b).

O SINTE, baseia-se na monitoração constante do comprimento do arco através da leitura da tensão média, e atuação em tempo real sobre o tempo de base para variar a corrente média, permanecendo inalterados a corrente de base, a corrente de pulso e o tempo de pulso.

O SINCOEX, como o SINTE, baseia-se na monitoração da tensão de arco, porém sua ação é sobre a velocidade de alimentação do arame.

O artigo de autoria de Klauss-Jürgen Matthes et alii [9], consiste em uma análise de controles sinérgicos de altura de arco disponíveis em equipamentos comerciais, tendo sido efetuado o estudo para o alumínio e aço austenítico cromo níquel.

No artigo, Klaus-Jürgen, cita que em primeiro lugar, existe uma lacuna de conhecimentos sobre a influência da altura de tomada de corrente (h), nas condições de penetração.

Klaus-Jürgen destaca que as mudanças na distância h , acima referida, podem ocorrer, não somente durante a soldagem manual, mas também nos casos de soldagem industrial com robôs, devido a fatores como acessibilidade desfavorável, tolerâncias de componentes e soldagem de bordas sobrepostas.

Os dois tipos de modulação analisados são: corrente de base / tensão do pulso (I_b -Up, modo misto) e corrente de base / corrente de pulso (I_b - I_p , corrente imposta e pulsada).

Apesar de serem apenas dois tipos de modulação considerados, os controles das variáveis da corrente pulsada podem ser diversos para cada um dos tipos de modulação. Nos casos examinados por Klaus-Jürgen, são verificadas as variações nos parâmetros elétricos: tensão e corrente, correspondentes à resposta da fonte a um aumento da altura de tomada de corrente.

O artigo de Klaus-Jürgen, não apresenta de forma clara o comportamento observado nos parâmetros elétricos das fontes, nem qual foi a dinâmica de variação da altura de tomada de corrente imposta nos experimentos. Porém é importante destacar os tipos de ensaios de variação de distância empregados (Fig. 7).

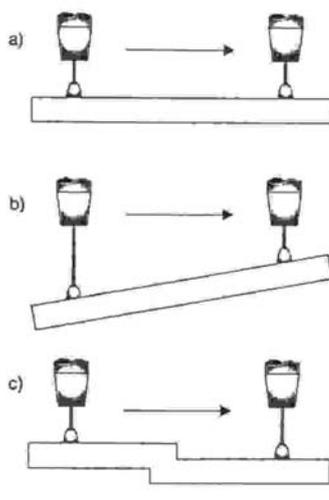


Fig. 7 Tipos de ensaios com variação de distância de tocha [9]

Os ensaios apresentados na figura acima envolvem:

- Soldagem sem variação da altura de tomada de corrente h , sendo realizados ensaios para diferentes alturas.
- Soldagem com variação contínua da altura de tomada de corrente h . Estes experimentos foram repetidos, variando-se a inclinação do metal de base, a velocidade de deslocamento da tocha e o sentido de deslocamento.
- Testes com mudança brusca da altura de tomada de corrente h , realizados simulando a soldagem de bordas sobrepostas. Os experimentos foram realizados para diferentes variações de mudança súbita, diferentes distâncias iniciais h e também variando-se a direção de deslocamento.

Os ensaios empregados neste trabalho são semelhantes aos realizados por Klaus-Jürgen, indicando a necessidade de padronização dos mesmos, principalmente por abordar um problema cada vez mais freqüente com o avanço da robotização.

5. MÉTODOS E MATERIAIS

Nos experimentos do presente trabalho foram utilizadas chapas de alumínio 1200 H14, arame ER 4043 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Argônio. Tanto as chapas como o arame, foram utilizados sem tratamentos específicos, apenas remoção de poeira da chapa, de forma a simular as condições industriais normais.

A máquina de solda utilizada foi uma fonte de soldagem multiprocesso transistorizada, modelo Inversal 300, de fabricação da IMC, dotada de interface para conexão com microcomputador.

O sistema de alimentação foi composto por cabeçote de alimentação, modelo STA20, também de fabricação da IMC, equipado com roletes em V e tocha Binzel, refrigerada, com mangote de 2 m de comprimento, com guia de teflon e bocal de 15 mm de diâmetro. Para fixação e deslocamento da tocha foi utilizado o conjunto Tartilope da IMC.

Para controle da fonte de soldagem, inversal 300, foi utilizado microcomputador Pentium II, com 200 MHz, equipado com placa para aquisição e controle, denominada Interdata, da IMC, dotada de saídas e entradas, tanto digitais, como analógicas.

Para efetuar o controle sinérgico da máquina de solda, Inversal 300, foi utilizado o programa computacional Migterm, especificamente desenvolvido e calibrado para esta função. No programa, foram inseridas rotinas específicas para abertura do arco e controle sinérgico de altura deste.

Para monitoração da soldagem, utilizou-se o sistema de aquisição portátil SAP, da IMC. Este sistema é equipado com sensores de corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás.

O sistema de aquisição, SAP, operando com microcomputador Pentium 100 MHz, efetua aquisições de sinais, a uma velocidade de 5 kHz, utilizando o software Oscilos.sap, para gerar oscilogramas das variáveis medidas e possibilitar medições através de cursores.

A vazão de gás foi medida através do sistema de aquisição portátil SAP, sendo ajustada para 15 l/min através do regulador de pressão.

Os corpos de prova, sem nenhum tratamento posterior a soldagem, foram fotografados com câmara digital, sendo necessário um maior escurecimento da foto devido ao elevado nível de reflexão das chapas. As imagens foram transferidas para o microcomputador através de programa específico do equipamento fotográfico.

5.1. MÉTODOS E MATERIAIS PARA ESTUDO DA ABERTURA DO ARCO

Os principais fatores determinantes do processo de abertura do arco, identificados nos estudos anteriores, são:

- A geometria da ponta do arame;
- A corrente de abertura;
- A velocidade de aproximação do arame.

Para identificar a influência destes fatores sobre a abertura do arco, foram conduzidos experimentos, combinando variações dos três fatores, que permitiram a identificação de seus efeitos sobre os principais aspectos indicadores das condições de abertura, que são:

- Tempo demandado até a abertura;
- Energia demandada até a abertura;
- Tensão de base imediatamente após a abertura.

Estes aspectos foram considerados significativos por estarem relacionados a características importantes do processo de abertura do arco. O tempo demandado até a abertura do arco é um aspecto crítico, já que o retardo da abertura pode levar o arame a embolar-se no sistema de alimentação. A energia demandada até a abertura está relacionada com o tipo de abertura, suave ou brusca. A tensão, por estar relacionada à altura do arco, é um aspecto importante para as condições de soldagem posteriores à abertura, já que o processo com imposição de corrente não assegura, ao longo da soldagem, um auto-controle do comprimento do arco.

O comando da fonte de soldagem foi efetuado via microcomputador, através do programa computacional Migterm, que alimentado com as informações de velocidade de aproximação do arame, corrente a ser imposta no momento do curto circuito, e tensão de identificação da condição de abertura do arco, comandava a fonte com base na monitoração constante da corrente e da tensão, seguindo a rotina abaixo:

1. Avançar arame com a velocidade de aproximação especificada, utilizou-se 0,017 m/s (1 m/min); 0,033 m/s (2 m/min) e 0,050 m/s (3 m/min);
2. Interromper a alimentação do arame após detectar corrente superior a 5 A;
3. Impor corrente de abertura especificada (utilizou-se 140, 240, 340 e 440 A);
4. Passar para a fase de regime, com corrente pulsada e velocidade de arame de regime, após identificar nível de tensão superior a 30 V.

O comando de interrupção da alimentação do arame objetiva evitar que o arame se embole, após tocar o metal base, caso não ocorra a abertura do arco, possibilitando a realização de experimentos com correntes de abertura relativamente baixas e geometrias de ponta do arame desfavoráveis à abertura.

O início do processo de abertura do arco, instante zero, foi definido como sendo o momento em que o arame-eletrodo toca o metal de base (Fig. 8). Esta condição foi identificada automaticamente pelo sistema de aquisição, através da elevação da corrente acima de 5 A.

Após iniciado o processo de abertura do arco, foi efetuada, automaticamente, a monitoração da tensão e corrente, sendo gerados oscilogramas (Fig. 8), que permitiram estudos posteriores quanto ao comportamento dos aspectos monitorados.

Com base nos oscilogramas obtidos, foram medidos os aspectos anteriormente selecionados:

t_{ab} - tempo demandado até a abertura, caracterizada pela elevação da tensão (Fig. 8);

E_{aa} - energia demandada até a abertura do arco;

U_b - tensão de base imediatamente após a abertura (Fig. 8).

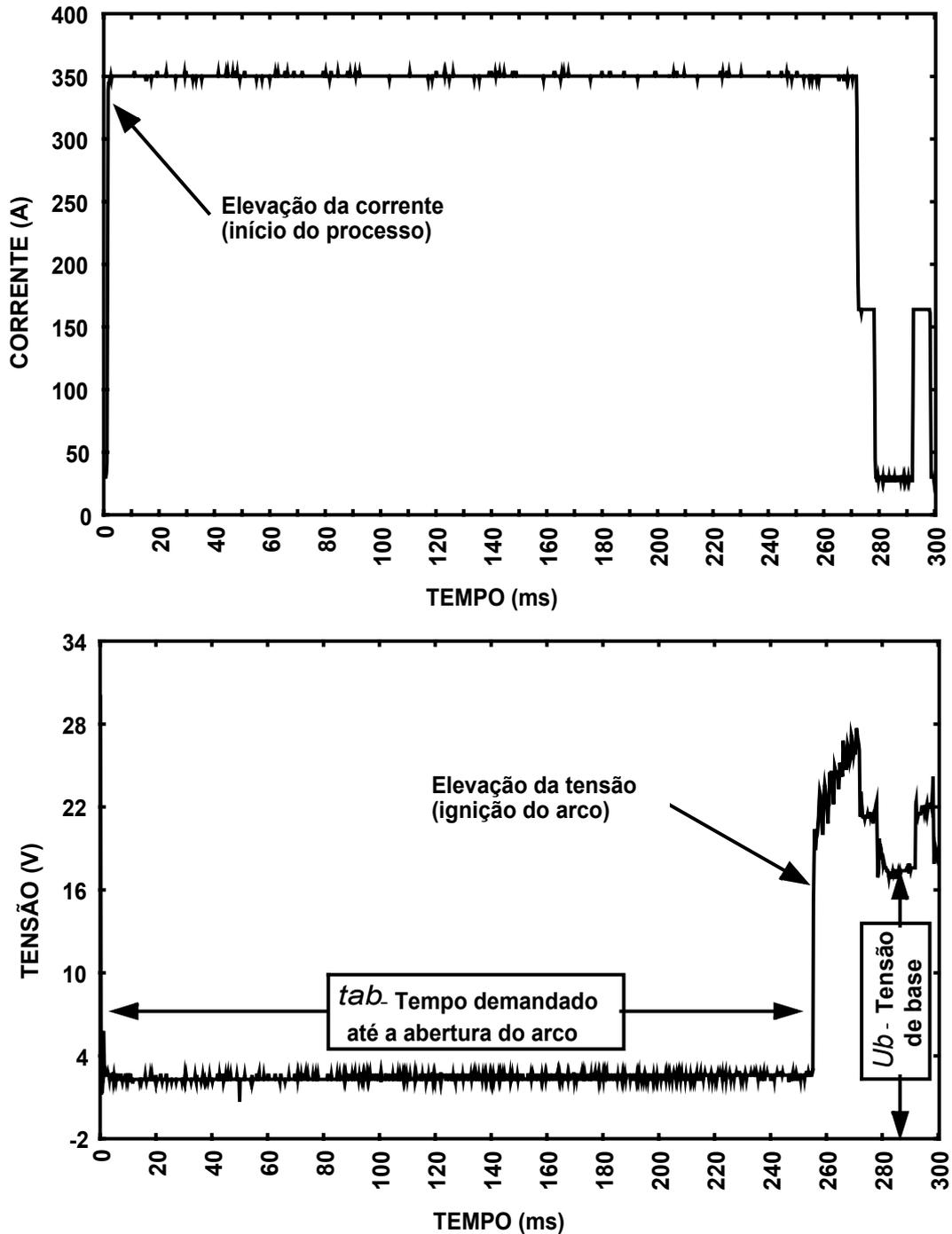


Fig. 8 Oscilogramas de corrente e tensão do ensaio de abertura do arco

Para possibilitar uma análise estatística da influência dos fatores, foi elaborado um projeto de experimentos com as seguintes características:

- Dois níveis de corrente nominal (I_{nom}): 340 e 440 A, sendo que a capacidade máxima da máquina utilizada é de 450 A;
- Duas geometrias de ponta do arame: cortado a 15° e ponta redonda;
- Duas velocidades de aproximação do arame (V_a): 0,017 e 0,050 m/s (1 e 3 m/min).

As combinações de variáveis possíveis estão apresentadas na tabela 2, tendo sido efetuados seis ensaios para cada combinação, de forma a possibilitar a exclusão de casos anormais e ser assegurada amostra de quatro elementos.

A codificação dos experimentos foi composta por uma letra e quatro dígitos, sendo que: a letra distingue as replicações; os dois dígitos seguintes correspondem a 1/10 da corrente (A) empregada no ensaio de abertura; o terceiro dígito corresponde à velocidade de aproximação do arame (m/min) e o quarto dígito identifica a geometria da ponta do arame, sendo 0 para ponta arredondada, 1 para ponta cortada a 15°, 4 cortada a 45° e 9 cortada a 90°.

Tabela 2 – Conjunto principal de experimentos de abertura

CÓDIGO DOS EXPERIMENTOS	I_{nom} (A)	V_a (m/min)	GEOMETRIA DA PONTA
(A,B,C,D,E,F) 3410	340	1	redonda
(A,B,C,D,E,F) 3411	340	1	15°
(A,B,C,D,E,F) 3430	340	3	redonda
(A,B,C,D,E,F) 3431	340	3	15°
(A,B,C,D,E,F) 4410	440	1	redonda
(A,B,C,D,E,F) 4411	440	1	15°
(A,B,C,D,E,F) 4430	440	3	redonda
(A,B,C,D,E,F) 4431	440	3	15°

Após realizados os ensaios iniciais, apesar do projeto de experimentos abranger os principais fatores envolvidos na faixa considerada como adequada, foram realizados mais alguns ensaios exploratórios.

Devido ao fato de ser possível a utilização de correntes mais baixas no processo de soldagem, uma vez que a corrente de transição para o material de adição empregado é inferior a 150 A, foi considerado importante o estudo da abertura em correntes inferiores às estabelecidas inicialmente. Para tanto, foi estruturado um conjunto complementar de experimentos, tabela 3, com: uma replicação, correntes nominais (I_{nom}) de 140 e 240 A e velocidade de aproximação do arame (V_a) de 1 m/min, considerada a mais adequada a uma abertura suave.

Tabela 3 – Conjunto de experimentos de abertura, com correntes de 140 e 240 A

CÓDIGO DOS EXPERIMENTOS	I_{nom} (A)	V_a (m/min)	GEOMETRIA DA PONTA
(A,B) 1410	140	1	redonda
(A,B) 1411	140	1	15°
(A,B) 2410	240	1	redonda
(A,B) 2411	240	1	15°

Com o objetivo de verificar a influência de outras configurações de geometria da ponta do arame, estabeleceu-se os experimentos apresentados na tabela 4, sendo fixada a corrente nominal (I_{nom}) em 440 A e a velocidade de aproximação (V_a) em 0,017 m/s (1 m/min), consideradas condições mais adequadas. Para tanto, foram estabelecidos ensaios, com uma replicação, para as condições de ponta cortada a 45° e 90°, além de um conjunto de ensaios, acompanhados de filmagem, com cada uma das diversas condições de ponta, 15, 45, 90° e redonda.

Tabela 4 – Conjunto de experimentos de abertura, variando a geometria de ponta do arame

CÓDIGO DOS EXPERIMENTOS	I_{nom} (A)	V_a (m/min)	GEOMETRIA DA PONTA	OBSERVAÇÃO
(A,B) 4414	440	1	45°	SEM FILMAGEM
(A,B) 4419	440	1	90°	SEM FILMAGEM
(G) 4411	440	1	15°	COM FILMAGEM
(C) 4414	440	1	45°	COM FILMAGEM
(C) 4419	440	1	90°	COM FILMAGEM
(G) 4410	440	1	redonda	COM FILMAGEM

As filmagens dos eventos representativos foi feita com o uso de filmadora 8 mm, com ajuste de exposição (shutter) 1/10.000, e filtro regulável, sendo convertidas para velocidade inferior à real, em fita VHS, de forma a melhorar a visualização da abertura do arco.

Para verificar a possibilidade de eliminar o sistema de interrupção da velocidade de arame na abertura, de modo a simplificar o sistema de controle, foram realizados ensaios complementares sem interrupção da alimentação após o contato.

Estes ensaios foram realizados com corrente de 440 A, geometria de ponta do arame arredondada e velocidades de aproximação de: 0,017 m/s (1 m/min) ; 0,033 m/s (2 m/min); 0,050 m/s (3 m/min); 0,067 m/s (4 m/min); 0,083 m/s (5 m/min) e 0,100 m/s (6 m/min), sendo identificadas as condições de abertura de arco bem sucedidas.

Os experimentos realizados consistiram na preparação da ponta do arame, seguida de abertura do arco sem deslocamento da tocha, esta, posicionada de forma a incidir perpendicularmente o arame sobre a chapa, com altura de tomada de corrente de 15 mm.

A preparação da ponta do arame foi feita por dois processos, um cortando-se a ponta com alicate de corte diagonal, estabelecendo, entre o gume de corte do alicate e o eixo longitudinal do arame, ângulos de 15, 45 e 90°, outro deixando a ponta arredondada como resultado aleatório após outra soldagem (formada por gota não destacada ao final da soldagem), não sendo fixado o diâmetro da ponta arredondada, de modo a simular as condições normais entre uma soldagem e outra.

Para os ensaios de abertura de arco, foram utilizadas chapas de alumínio com espessura de 3 mm e dimensões de 100 x 180 mm.

Foram realizadas diversas aberturas de arco em cada corpo de prova, sendo mantido o espaçamento de 40 mm entre os pontos de abertura e 30 mm destes para a borda da chapa mais próxima, como apresentados na Fig. 9.

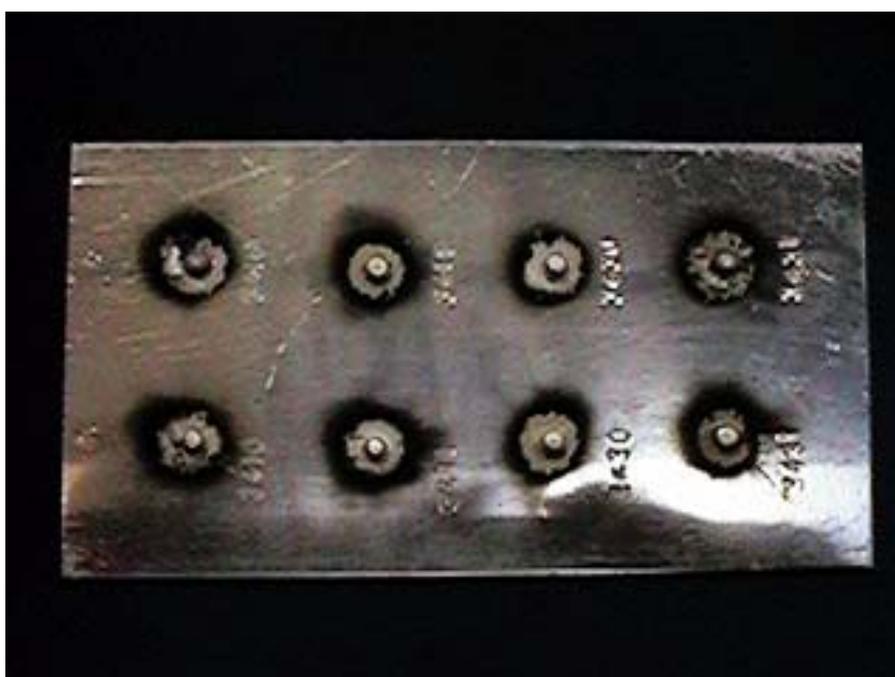


Fig. 9 Corpo de prova de ensaio de abertura de arco

5.2. MÉTODOS E MATERIAIS PARA DETERMINAÇÃO BÁSICA DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS ADEQUADAS À CORRENTE PULSADA

Este estudo subdividiu-se em estudo da corrente de transição para determinação da relação entre as variáveis da corrente pulsada e estudo da influência do nível da corrente de pulso no acabamento do cordão de solda.

5.2.1. MÉTODOS E MATERIAIS PARA ESTUDO DA CORRENTE DE TRANSIÇÃO

Para a identificação da corrente de transição do material considerado neste trabalho, foi efetuado o levantamento dos parâmetros de destacamento: corrente, período e volume de gota, para diversos níveis de corrente média.

A partir dos conjuntos de parâmetros obtidos, foi identificada a condição com destacamento de gotas de diâmetro igual ao do arame, na qual a corrente média corresponde à corrente de transição. Esta condição foi expressa através do parâmetro de destacamento (D), utilizado posteriormente, na determinação dos parâmetros da corrente pulsada.

Para tanto, foram conduzidos ensaios, com a máquina operando em comando de tensão, sendo variada a velocidade do arame progressivamente, a cada ensaio, de forma a produzir o destacamento de gotas em diversos níveis de corrente média.

Estes ensaios foram monitorados através do sistema de aquisição, que forneceu oscilogramas de corrente e tensão (Fig. 10), possibilitando medições das variáveis através de cursores.

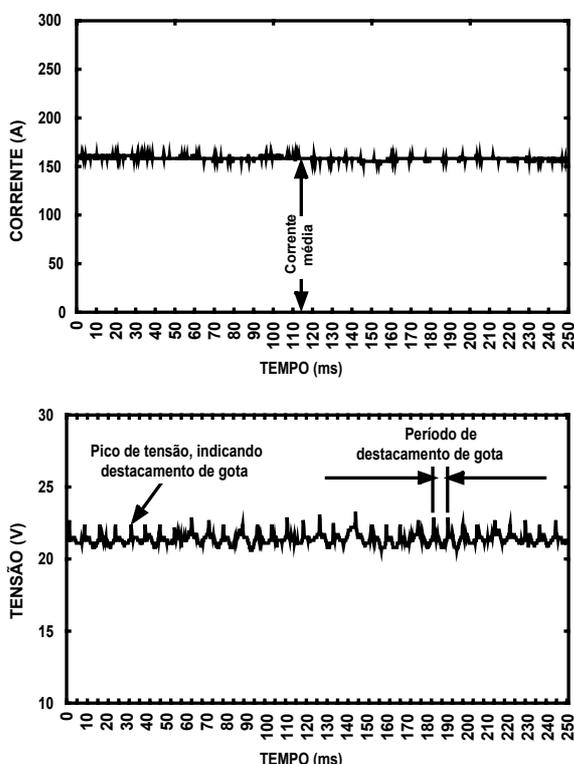


Fig. 10 Oscilogramas de tensão e corrente para determinação da corrente de transição

Os dados obtidos através do sistema de aquisição foram analisados com auxílio de planilha eletrônica, de forma a identificar o intervalo de destacamento das gotas, e com base nestes intervalos, foi estabelecido o tempo modal de transferência para os vários níveis de corrente.

Com base nos tempos modais de transferência e nas velocidades de arame, identificou-se matematicamente o volume modal de gota para cada velocidade de arame ensaiada e, assim, para cada corrente média relacionada.

Foi então traçado o gráfico da corrente média pelo volume modal de gota, possibilitando a identificação da região de transição de transferência globular para escoamento goticular axial e a determinação do parâmetro de destacamento (D) correspondente.

Para estes ensaios foram utilizadas duas máquinas de solda. A primeira, a Elma Analog C 400 P, com cabeçote alimentador Elma, considerada mais adequada aos ensaios, por ser analógica, e assim evitar os problemas decorrentes da existência de ripple nos sinais de tensão e corrente. A Segunda, a Inversal 300 com cabeçote de alimentação STA 20, que foi utilizada para verificar sua adequação a este tipo de ensaio.

As condições utilizadas nos experimentos foram:

- Velocidade de soldagem: 0,006667 m/s (40 cm/min);
- Velocidades de alimentação do arame: 0,067 m/s (4,0 m/min); 0,075 m/s (4,5 m/min); 0,083 m/s (5,0 m/min); 0,092 m/s (5,5 m/min); 0,100 m/s (6,0 m/min); e 0,108 m/s (6,5 m/min);
- Tensão comandada: 20 a 22 V;
- Vazão de gás: 15 l/min;
- Tocha posicionada de forma a incidir perpendicularmente o arame sobre a chapa;
- Altura de tomada de corrente de 15 mm;
- Chapas à temperatura ambiente, com espessura de 6 mm e dimensões de 100 x 200 mm (Fig. 11).

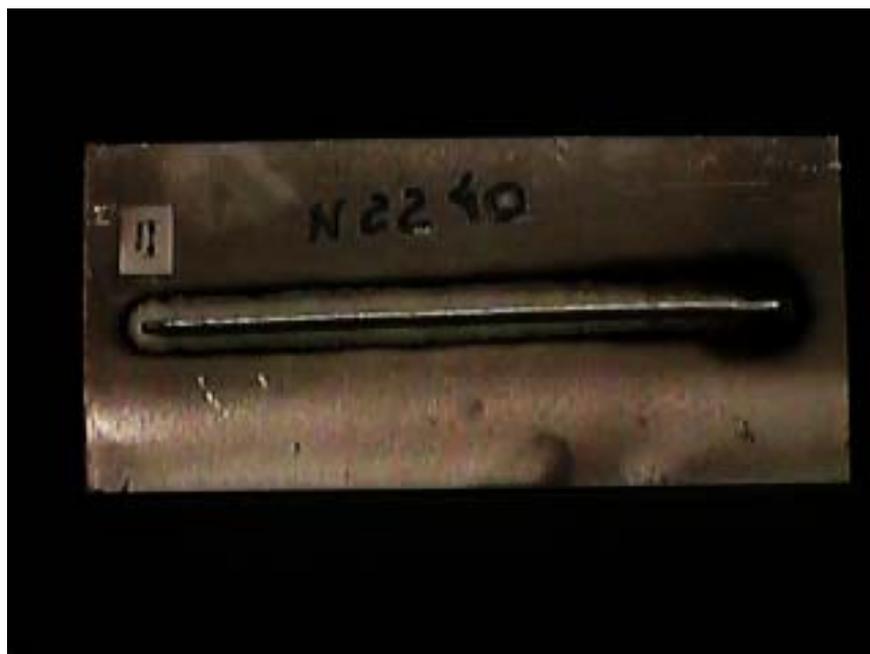


Fig. 11 Corpo de prova para determinação da corrente de transição

5.2.2. MÉTODOS E MATERIAIS PARA ESTUDO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA

Para a determinação dos parâmetros e variáveis da corrente pulsada, adequadas ao material utilizado neste trabalho, foram conduzidos experimentos em diversos níveis de corrente de pulso, sendo realizados os ensaios, tanto no sentido puxando, como empurrando.

Os experimentos foram monitorados através do sistema de aquisição, que forneceu os oscilogramas de tensão e corrente de cada ensaio, permitindo a identificação das condições de destacamento de gota.

Com base no parâmetro de destacamento (D), obtido anteriormente, estabeleceu-se, inicialmente, as relações das amplitudes e durações das correntes de pulso a serem ensaiadas, sendo reajustado o conjunto destas variáveis, até a obtenção de apenas um destacamento de gota por pulso, o que foi identificado através da observação dos oscilogramas (Fig. 12).

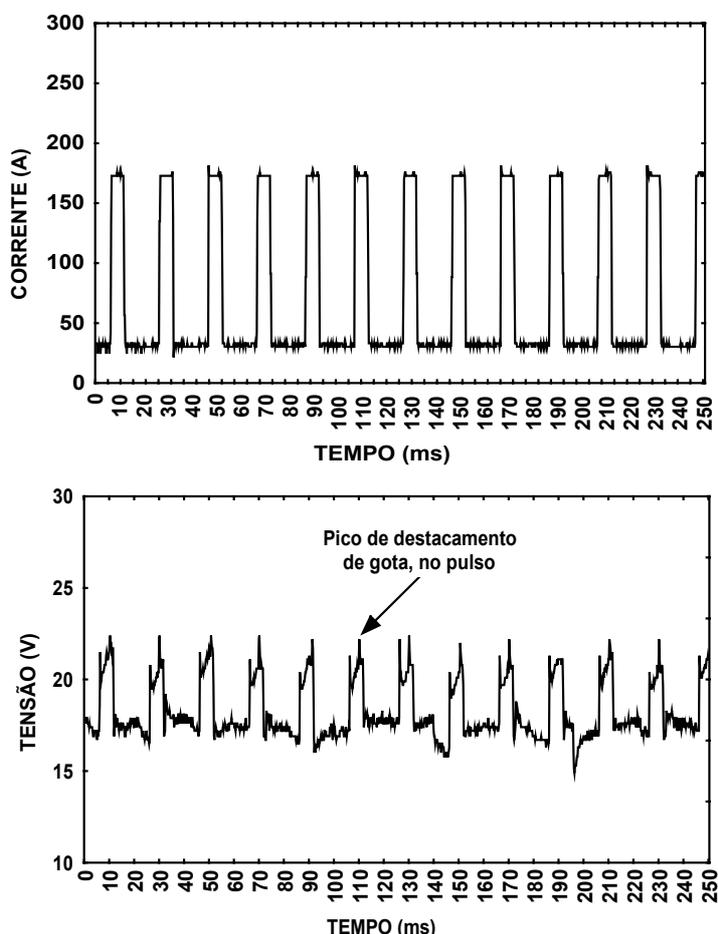


Fig. 12 Oscilogramas de corrente e tensão para estudo do efeito da corrente de pulso

Para reduzir a influência de outros fatores nos experimentos, fixou-se: a corrente média, a velocidade do arame, o tamanho de gota e a vazão de gás, sendo alterados, em conjunto, as amplitudes e durações das correntes de base e de pulso.

A tocha foi posicionada com inclinação de 15° em relação ao eixo vertical na direção do cordão, permitindo a soldagem nos sentidos, puxando e empurrando, invertendo-se, apenas, o sentido do deslocamento.

Nos experimentos foram utilizadas as seguintes condições:

- velocidade de deslocamento da tocha: 0,005 m/s (30 cm/min);
- velocidades de alimentação do arame: 0,052 m/s (3,1 m/min);
- corrente média: de 70 A;
- diâmetro de gota: 1,32 mm ;
- vazão de gás: 15 l/min;
- correntes de pulso: 160, 170, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300 A;
- Chapas à temperatura ambiente.

Foram utilizadas chapas com espessura de 3 mm e dimensões de 100 x 200 mm, sendo depositados, em cada chapa, dois cordões de solda com o mesmo conjunto de parâmetros e variáveis, porém um no sentido puxando e o outro no sentido empurrando. Foi mantido um afastamento de 40mm entre os cordões depositados, e de 30 mm entre estes e a borda mais próxima da chapa. A análise visual dos corpos de prova, possibilitou a comparação entre o acabamento produzido com os diversos níveis de corrente de pulso e o sentido de soldagem.

5.3. MÉTODOS E MATERIAIS PARA DESENVOLVIMENTO DE CONTROLE SINÉRGICO DA ALTURA DE ARCO

Este estudo consistiu de um trabalho voltado ao desenvolvimento de uma sistemática de controle sinérgico de altura de arco, que envolveu a programação em linguagem pascal, para estruturar a rotina do controle sinérgico, e ensaios com deposição de cordões de solda sobre chapas, para testar a eficácia do sistema de controle desenvolvido.

O sistema de controle sinérgico foi estruturado para operar com realimentação ao longo de todo o processo de soldagem, determinando a modulação da frequência dos pulsos para controle da altura do arco .

Partindo do princípio de que a tensão é um indicador da altura de arco, foram verificadas três opções de leitura de tensão: na base, no pulso e a média destas. Como a medição da tensão no pulso apresenta imprecisão, devido ao elevado nível da corrente durante o pulso e a tensão média seria influenciada pela modulação da frequência, a tensão de base foi então considerada o indicador mais adequado da altura de arco.

No controle sinérgico de altura do arco, proposto, é efetuada a leitura da tensão de base, que, comparada a um valor de referência, correspondente a uma altura de arco desejada, determina a correção a ser efetuada no tempo de base da corrente pulsada. Este mecanismo provoca a modulação da frequência dos pulsos e assim, permite variar a taxa de consumo do arame-eletrodo, ajustando a altura do arco.

Após desenvolvido o programa, realizou-se alguns experimentos, com soldagem manual, para testar a eficácia do sistema, onde se provocava variações na distância da tocha ao metal de base. Estes ensaios indicaram que outros fatores, não previstos, afetavam o controle da altura do arco, por provocarem uma flutuação na relação entre a tensão e o comprimento do arco.

A variação da emissividade da poça de fusão foi identificada como possível causa da flutuação na relação entre a tensão e o comprimento do arco, podendo ser influenciada por fatores como a dimensão da poça, a temperatura da chapa e a limpeza catódica. Esta suposição conduziu à ensaios que, utilizando como gás de proteção, misturas de argônio com aproximadamente 0,2% de oxigênio, favorecessem uma maior uniformidade de emissores catódicos na poça, de modo a tornar a relação entre tensão e altura de arco mais constante. As misturas de gases foram efetuadas com o uso do misturador de gases modelo KM60-2 da Witt.

Após alguns ensaios, verificou-se a necessidade de estabelecer uma variação constante da distância entre o bico de contato e o metal de base para confirmar a eficácia do sistema de controle. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova específicos, produzidos a partir de chapas de 3 mm e dimensões de 100 x 300, que foram corrugadas por dobramento, sendo utilizada, inicialmente, altura de 15 mm e distância entre picos de 60 mm, fornecendo uma rampa com inclinação de 15/30, correspondendo a um ângulo de 26,5°.

Para estabelecer um estudo comparativo entre os sistemas não realimentados e o sistema proposto, com controle sinérgico de altura do arco, foram conduzidos experimentos nas seguintes condições:

- corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, sem controle sinérgico da altura do arco, utilizando gás argônio puro;
- modo misto, impondo corrente na base e comandando tensão no pulso, utilizando gás argônio puro;
- corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, com controle sinérgico da altura do arco, utilizando gás argônio puro;
- corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, com controle sinérgico da altura do arco, utilizando mistura de gases, argônio e oxigênio.

Estes experimentos consistiram na deposição de cordões de solda sobre os corpos de prova corrugados, especificados anteriormente, nos quais foi utilizado:

- Velocidade de deslocamento da tocha: 0,005 m/s (30 cm/min);
- Velocidades de alimentação do arame: 0,052 m/s (3,1 m/min);
- Corrente média: 70 A;
- Vazão de gás: 15 l/min;
- Correntes de pulso: 170 A (nos casos de imposição de corrente);
- Chapas à temperatura ambiente;

A tocha foi posicionada de forma a incidir o arame perpendicularmente ao plano médio da chapa e manter uma distância mínima de 10 mm, desta ao bico de contato.

Foi efetuada a filmagem do processo de soldagem para análise da estabilidade do comprimento do arco, sendo utilizada câmara filmadora VHSC. A observação dos corpos de prova e das filmagens, permitiu a análise comparativa das quatro condições consideradas:

6. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS

6.1. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS DE ABERTURA DO ARCO

O principal conjunto de experimentos, projetado com três fatores (corrente, geometria da ponta e velocidade de aproximação), dois níveis e amostras de quatro elementos, forneceu os resultados conforme tabela 5.

TABELA 5 – Resultados do conjunto principal de experimentos de abertura

Código do experimento	I nom. (A)	Va (m/min)	PONTA	tab (ms)	Eaa (J)	Ub (V)
A3411	340	1	15 °	0,5	0	16,8
B3411	340	1	15 °	0,8	0	16,3
C3411	340	1	15 °	1	0	17
D3411	340	1	15 °	1,3	0	15,8
A3410	340	1	REDONDA	317	412	18
B3410	340	1	REDONDA	322,4	377	18,8
C3410	340	1	REDONDA	297,6	236	19,5
D3410	340	1	REDONDA	292,6	266	17
A3431	340	3	15 °	0,8	0	16
B3431	340	3	15 °	3	3	16,8
C3431	340	3	15 °	0,6	0	17,3
D3431	340	3	15 °	1,4	1	16,8
A3430	340	3	REDONDA	263,6	286	18
B3430	340	3	REDONDA	276,8	416	19
C3430	340	3	REDONDA	300,5	518	17
D3430	340	3	REDONDA	286,8	266	20
A4411	440	1	15 °	0,9	1	15,5
B4411	440	1	15 °	0,6	0	16
C4411	440	1	15 °	0,4	0	16,8
D4411	440	1	15 °	1,2	1	17
A4410	440	1	REDONDA	201	589	19,8
B4410	440	1	REDONDA	183,4	471	17,5
C4410	440	1	REDONDA	196,8	317	18
D4410	440	1	REDONDA	188,8	459	18,3
A4431	440	3	15 °	0,8	0	15,5
D4431	440	3	15 °	2,4	0	16,5
E4431	440	3	15 °	2,4	1	16,3
F4431	440	3	15 °	1	1	16,6
A4430	440	3	REDONDA	198,2	397	16,5
B4430	440	3	REDONDA	189,6	458	18
C4430	440	3	REDONDA	182,6	183	17,3
D4430	440	3	REDONDA	181	210	16,8

Para identificar a influência dos fatores estudados, bem como de suas interações, foi realizada a análise das variâncias, aplicando-se o teste estatístico F (Fischer). Para realização destes testes, foi utilizado o software Statistica, versão 5.0, que forneceu os resultados apresentados nas tabelas 6, 7 e 8.

TABELA 6 - ANOVA DO TEMPO DEMANDADO ATÉ A ABERTURA DO ARCO

FATORES:1-VELOCIDA, 2-PONTA, 3-CORRENTE

Fatores	Graus de liberdade do tratamento	Quadrado médio do tratamento	Graus de liberdade do erro amostral	Quadrado médio do erro amostral	Razão F	Probabilidade de erro do tipo I, p-level
1	1	411,85	24	72,56	5,68	0,025474
2	1	465516,00	24	72,56	6415,21	0,000000
3	1	21819,61	24	72,56	300,69	0,000000
12	1	497,70	24	72,56	6,86	0,015046
13	1	223,66	24	72,56	3,08	0,091908
23	1	21850,95	24	72,56	301,13	0,000000
123	1	210,13	24	72,56	2,90	0,101737

TABELA 7 - ANOVA DA ENERGIA DEMANDADA ANTES DA ABERTURA

FATORES:1-VELOCIDA, 2-PONTA, 3-CORRENTE

Fatores	Graus de liberdade do tratamento	Quadrado médio do tratamento	Graus de liberdade do erro amostral	Quadrado médio do erro amostral	Razão F	Probabilidade de erro do tipo I, p-level
1	1	4728,78	24	6514,16	0,73	0,402630
2	1	1070550,25	24	6514,16	164,34	0,000000
3	1	2945,28	24	6514,16	0,45	0,507745
12	1	4925,28	24	6514,16	0,76	0,393169
13	1	19355,28	24	6514,16	2,97	0,097616
23	1	2945,28	24	6514,16	0,45	0,507745
123	1	18963,78	24	6514,16	2,91	0,100878

TABELA 8 - ANOVA DA TENSÃO DE BASE (APÓS A ABERTURA)

FATORES:1-VELOCIDA, 2-PONTA, 3-CORRENTE

Fatores	Graus de liberdade do tratamento	Quadrado médio do tratamento	Graus de liberdade do erro amostral	Quadrado médio do erro amostral	Razão F	Probabilidade de erro do tipo I, p-level
1	1	0,43	24	0,69	0,62	0,439939
2	1	21,95	24	0,69	31,64	0,000009
3	1	1,85	24	0,69	2,67	0,115235
12	1	0,75	24	0,69	1,08	0,308684
13	1	1,58	24	0,69	2,27	0,144860
23	1	0,20	24	0,69	0,28	0,600548
123	1	0,58	24	0,69	0,83	0,370482

Deve-se observar que o nível de significância indicado no teste (p-level), reflete a probabilidade de erro de tipo I, ou seja, é a probabilidade de se considerar que o fator estudado tem influência sobre o item observado, sendo isto falso.

Assumindo o nível de significância de 5 %, como satisfatório aos estudos, considerou-se que os fatores e interações que apresentam nível de significância (p-level) inferiores a 0,05 (5%) exercem influência sobre o item observado.

Verifica-se, nos resultados da análise da variância, que a geometria da ponta, a corrente e a velocidade de aproximação do arame e suas interações produzem efeitos sobre os três itens analisados.

A geometria da ponta do arame exerce influência sobre: o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}); a energia demandada antes da abertura do arco (E_{aa}) e a tensão de base após a abertura (U_b).

A corrente exerce influência significativa sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

A velocidade de aproximação do arame exerce influência sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

A interação entre a corrente e a geometria da ponta do arame exerce influência sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

A interação entre a velocidade de aproximação do arame e a geometria da ponta do arame, exerce influência sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

Os fatores que exercem influência sobre os aspectos considerados, estão assinalados com “X” no quadro demonstrativo de influência dos fatores estudados (Fig. 13), onde estão indicadas as figuras correspondentes aos efeitos verificados .

		ASPECTOS MEDIDOS		
		t_{ab}	E_{aa}	U_b
FATORES ESTUDADOS	GEOMETRIA DA PONTA DO ARAME	X (Fig. 14)	X (Fig. 15)	X (Fig. 16)
	CORRENTE DE ABERTURA	X (Fig. 17)		
	VELOCIDADE DE APROXIMAÇÃO DO ARAME	X (Fig. 18)		
	INTERAÇÃO - CORRENTE DE ABERTURA E GEOM. DA PONTA	X (Fig. 19)		
	INTERAÇÃO – VEL. APROXIMAÇÃO DO ARAME E A GEOM. DA PONTA	X (Fig. 20)		

Fig. 13 – Quadro demonstrativo das influências dos fatores estudados

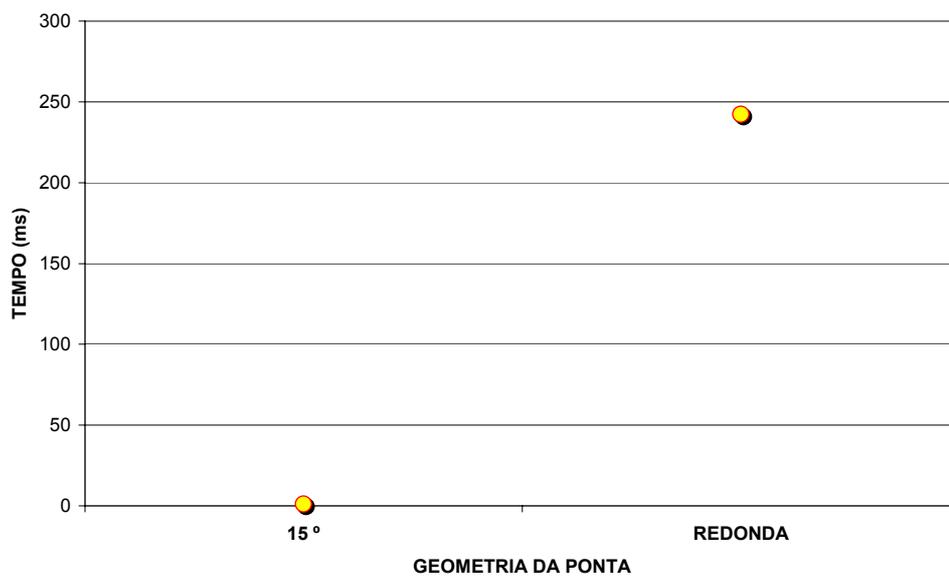


Fig. 14 Influência da geometria da ponta do arame no tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

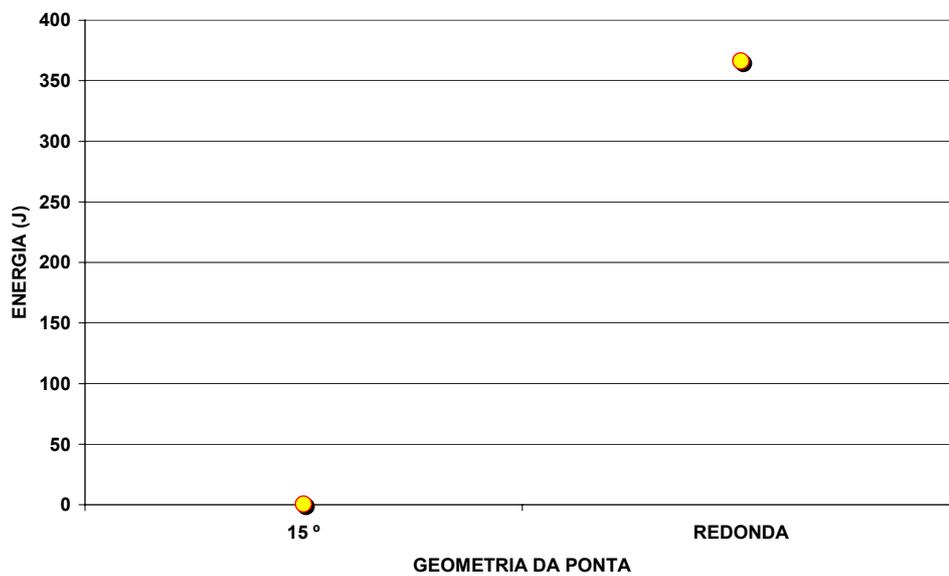


Fig. 15 Influência da geometria da ponta do arame na energia demandada antes da abertura do arco (E_{aa}).

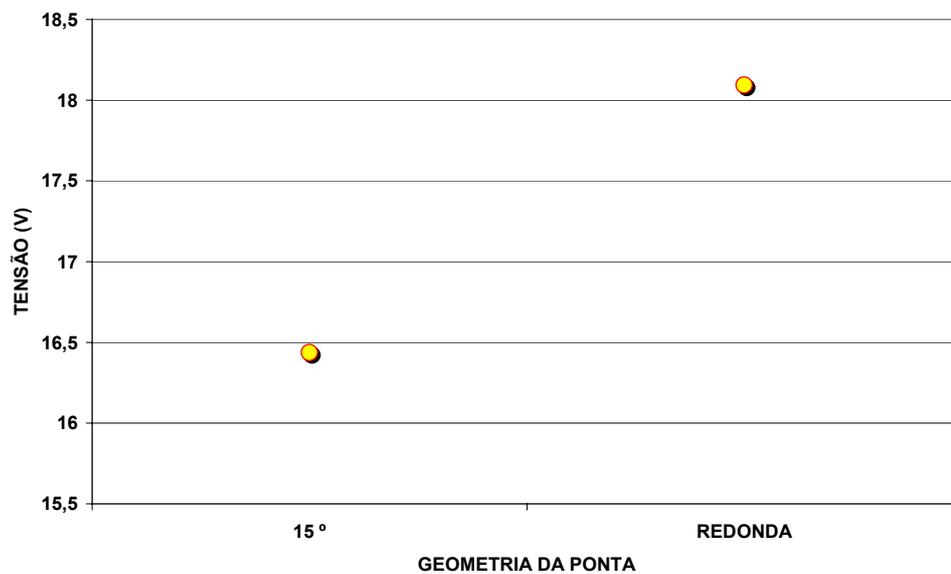


Fig. 16 Influência da geometria da ponta do arame na tensão de base após a abertura (U_b).

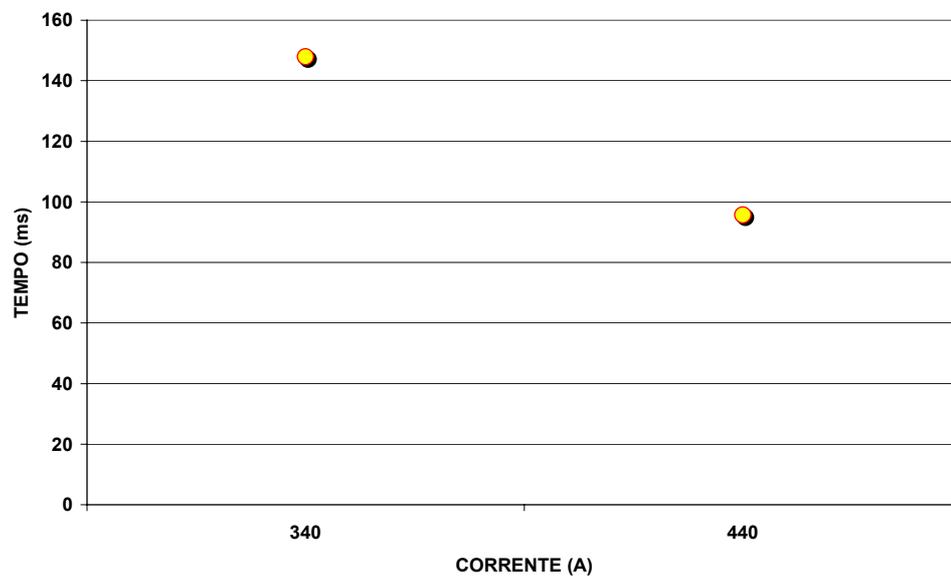


Fig. 17 Influência da corrente no tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

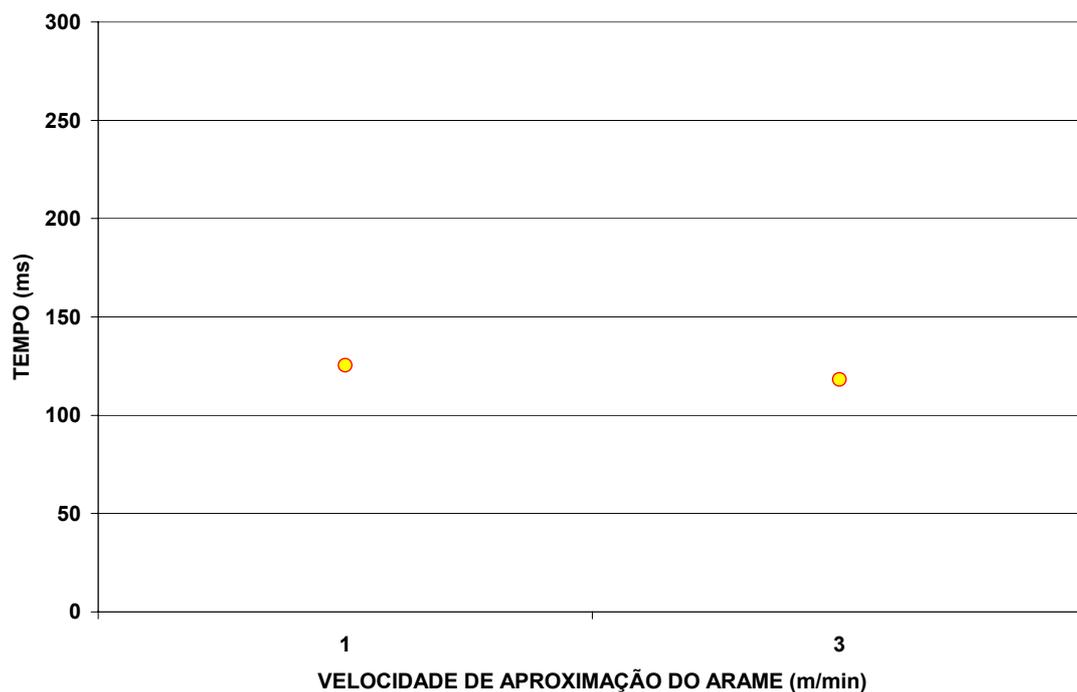


Fig. 18 Influência da velocidade de aproximação do arame sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

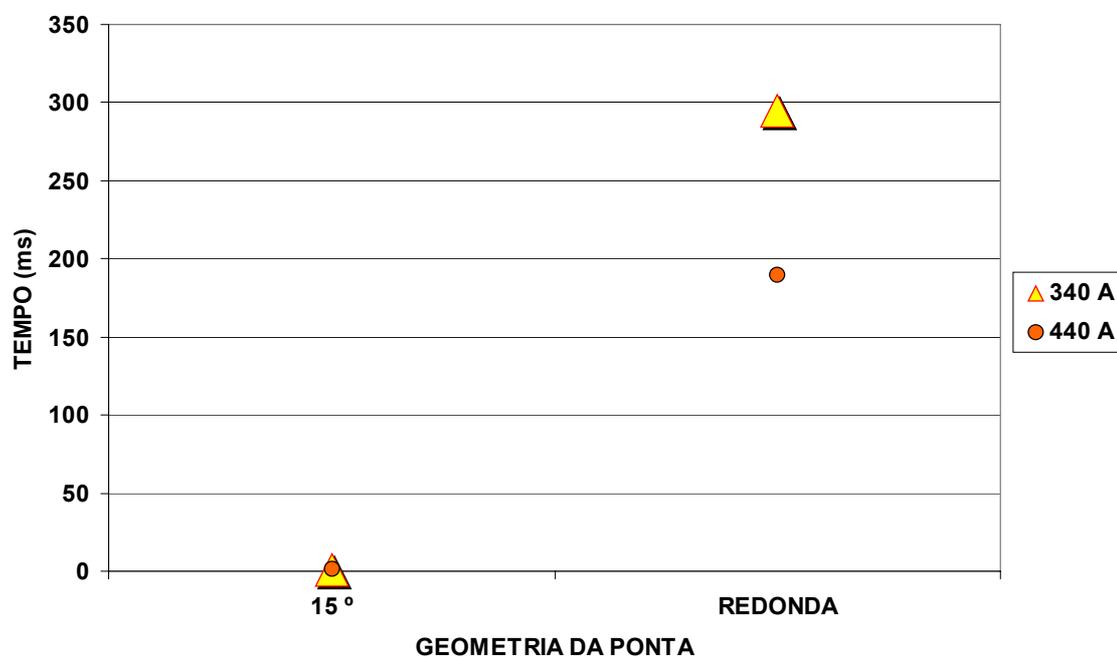


Fig. 19 Influência da corrente e da geometria da ponta do arame sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).



Fig. 20 Influência da velocidade de aproximação e da geometria da ponta do arame, sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}).

Verifica-se, através dos gráficos apresentados, que a influência da geometria da ponta do arame e da corrente, sobre o tempo demandado até a abertura do arco é da ordem de 200 ms, porém os efeitos da velocidade de aproximação do arame são muito pequenos, da ordem de 10 ms.

Considerando como mais adequada a situação que produz um menor tempo para obtenção da abertura, deve-se optar por uma geometria de ponta afiada e uma corrente de abertura elevada.

Analisando as condições de soldagem automatizada, a extinção involuntária do arco pode provocar descontinuidades no cordão de solda, caso o tempo para uma nova abertura seja excessivo. Como a extinção acidental do arco produz uma condição de reabertura do arco com geometria de ponta arredondada, esta condição, embora indesejável, deve ser assumida como condição normal, sendo assim, de grande relevância o uso de maiores níveis de corrente de abertura.

A influência da geometria da ponta sobre a energia demandada antes da abertura do arco, confirma os estudos apresentados por D. Farson, sendo a energia um indicador do tipo de abertura ocorrida, suave ou brusca, que está relacionada à geometria da ponta do arame, cortada ou arredondada, respectivamente.

Os resultados indicam que a geometria da ponta do arame exerce influência sobre a tensão de base após a abertura do arco, sendo que, aberturas efetuadas com a ponta do arame arredondada apresentaram maiores níveis de tensão de base após a abertura, indicando um maior comprimento de arco.

Verificou-se, através de filmagens, que a altura do arco está relacionada à posição onde ocorre a fragmentação do arame na abertura, que pode ocorrer, ou na região de contato do arame-eletrodo com o metal de base, quando a ponta está afiada,

resultando em menor altura de arco, ou no comprimento médio do arame-eletrodo, quando a ponta deste está arredondada, resultando em maior altura de arco, o que é coerente com os estudos de D. Farson, apresentados anteriormente.

Considerando que a ponta do arame pode ser, cortada ou arredondada, conforme intervenção do soldador, a altura do arco estará, também, sujeita à esta intervenção. Como a altura do arco exerce influência na porosidade da solda, torna-se necessário o uso de mecanismos que promovam a adequação desta altura, após a abertura, de forma a reduzir defeitos na solda.

A influência da velocidade de aproximação do arame e das combinações desta com os outros fatores, não são expressivas. A pequena influência verificada pode ser atribuída ao fato da dinâmica de interrupção da velocidade de alimentação do arame ser diferente para cada velocidade, sendo afetada pela inércia do sistema de alimentação.

Aparentemente, a pequena influência da velocidade de alimentação verificada, não condiz com o estudo apresentado por D. Farson, porém, deve-se destacar que em seus ensaios não houve a interrupção da alimentação do arame por ocasião do contato deste com o metal de base, por ser um controle não disponível nos equipamentos convencionais.

O conjunto dos resultados dos ensaios complementares está apresentado na tabela 9.

TABELA 9 – Resultados dos experimentos complementares de abertura

Código do experimento	I nom. (A)	Va (m/min)	PONTA	tab (ms)	Eaa (J)	Ub (V)
A1410	140	1	REDONDA	3357,3	606	23
B1410	140	1	REDONDA	3465,5	984	19
A1411	140	1	15 °	3,2	2	20,8
B1411	140	1	15 °	3,2	2	19,3
A2410	240	1	REDONDA	604,0	403	20,3
B2410	240	1	REDONDA	684,3	435	17,3
A2411	240	1	15 °	0,8	0	16,3
B2411	240	1	15 °	1,0	1	17,3
A4414	440	1	45 °	0,8	0	16,5
B4414	440	1	45 °	0,5	0	17,3
A4419	440	1	90 °	1,0	0	15,8
B4419	440	1	90 °	1,0	0	15,8
G4411	440	1	15 °	0,6	0	16,3
C4414	440	1	45 °	0,6	0	15,8
C4419	440	1	90 °	0,6	0	16,5
G4410	440	1	REDONDA	22,6	35	16

Acrescendo aos resultados, os experimentos complementares, verifica-se que o efeito da corrente é coerente com os ensaios principais, sendo mais acentuada a diferença dos resultados obtidos com corrente de 140 A, que provocou um aumento significativo no tempo para início da abertura (Fig. 21).

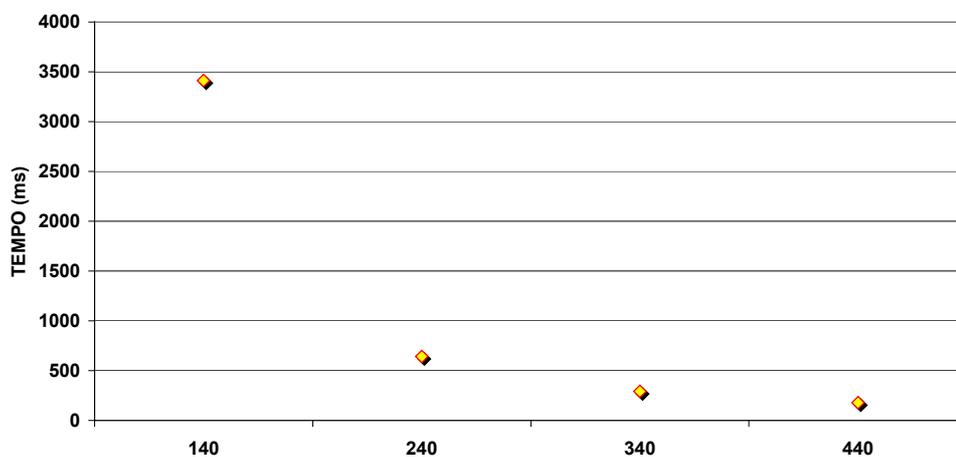


Fig. 21 Influência da corrente sobre o tempo demandado até a abertura do arco (t_{ah}). acrescidos os ensaios complementares.

Verificou-se, também, que não houve diferença significativa entre os efeitos resultantes dos vários ângulos de corte da ponta do arame (15° , 45° e 90°), podendo ser a geometria de corte categorizada em ponta cortada ou arredondada. (Fig. 22).

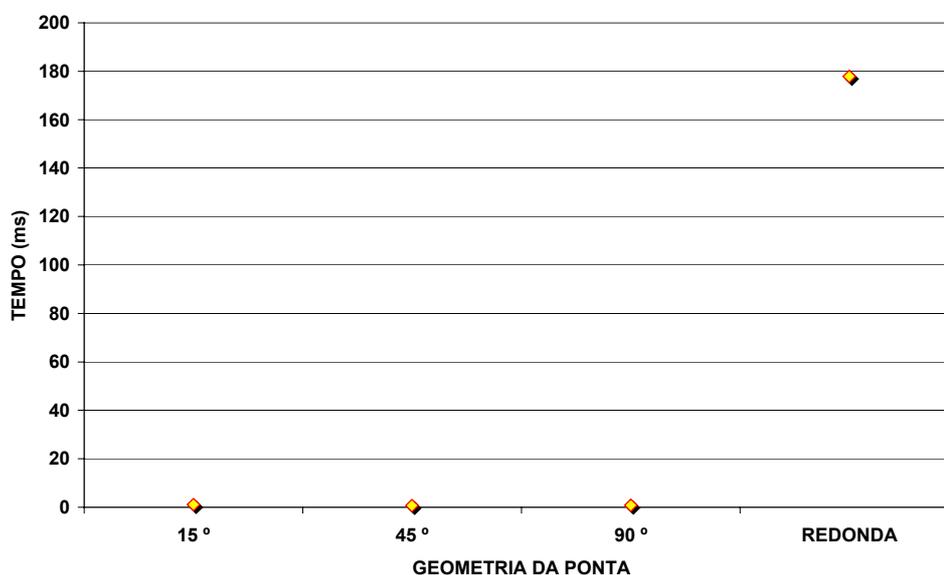


Fig. 22 Influência da geometria da ponta do arame no tempo demandado até a abertura do arco (t_{ab}), acrescidos os ensaios complementares.

Nos ensaios efetuados para verificar a possibilidade de eliminar o sistema de interrupção da alimentação do arame na abertura, velocidades de aproximação de 0,017 m/s (1 m/min) 0,033 m/s (2 m/min); 0,050 m/s (3 m/min); 0,067 m/s (4 m/min) e 0,083 m/s (5 m/min), resultaram em aberturas bem sucedidas, porém com velocidade de 0,100 m/s (6 m/min) o arame embolou-se no mecanismo alimentador, provocando a fusão do arame-eletrodo no bico de contato.

Na figura (Fig. 23), observa-se que não há formação de depósito para a condição de velocidade de arame de 0,100 m/s (6 m/min). Isto se deve ao fato do arame ter embolado no mecanismo de alimentação antes de ocorrer a abertura, interrompendo alimentação.



Fig. 23 Corpo de prova do ensaio de abertura sem parada do arame

6.2. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO BÁSICA DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS ADEQUADAS À CORRENTE PULSADA

6.2.1. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE TRANSIÇÃO

Os experimentos utilizando tensão constante e diversas velocidades de arame forneceram oscilogramas, e conjuntos de dados de tempo, corrente, tensão, obtidos a intervalos de 0,2 ms.

A utilização da máquina Inversal 300, para os ensaios de determinação da corrente de transição, não apresentou problemas, pois foi verificado um pequeno ripple apenas nos oscilogramas de corrente, não dificultando a identificação dos picos de tensão, característicos do destacamento de gotas.

Com base nos dados obtidos, foram medidos os intervalos de tempo entre os picos de tensão nas diversas condições de velocidade de arame. Considerando que os picos de tensão correspondem aos destacamentos de gota, com base nos histogramas dos períodos de destacamento de gota, para cada velocidade de arame, anexo 1, foi determinado o tempo modal de transferência para cada condição ensaiada, conforme tabela 8.

Com base na equação 1 e nas relações geométricas, foi calculada a corrente média, o volume modal de gota e o diâmetro modal de gota para cada uma das condições de velocidade de arame, permitindo, estabelecer o conjunto de dados apresentados na tabela 10.

Va (m/min)	Tmod. (ms)	Corr.média Im (A)	Vol.mod. (mm ³)	dg mod. (mm)
4	45	102	3,393	1,864
4,5	29	117	2,460	1,675
5	15	135	1,414	1,392
5,5	8,5	148	0,881	1,189
6	7,7	157	0,871	1,185
6,5	6,3	173	0,772	1,138

sendo:

V_a , a velocidade de alimentação do arame em m/min;

$T_{mod.}$, o período modal de destacamento de gota em ms;

I_m , a corrente média em A;

$Vol. mod.$, O volume modal da gota em mm³ ;

$d_g mod.$, o diâmetro modal de gota em mm .

A representação gráfica da relação entre o volume modal e a corrente média permite identificar a mudança no comportamento da transferência de gotas, caracterizada por uma mudança súbita de inclinação da curva, indicando a transição de um regime de transferência globular para o escoamento goticular axial (Fig. 24).

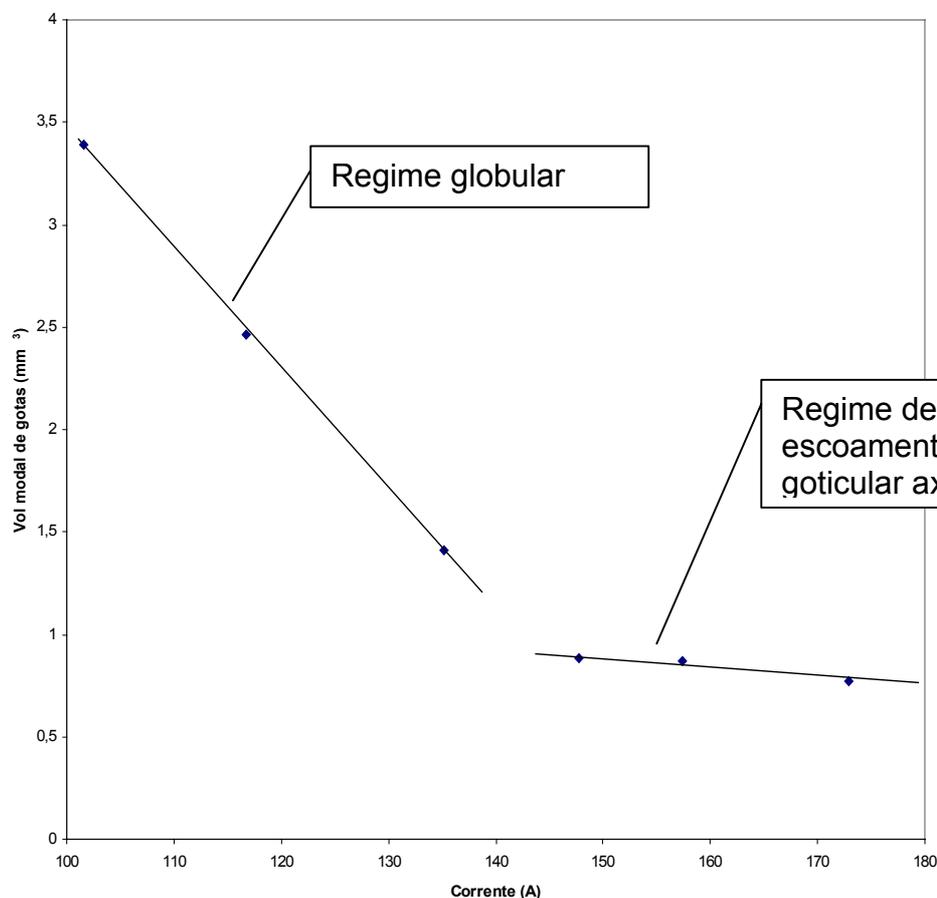


Fig. 24 Volume modal de gota x corrente média para arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro

Com base na tabela 8, considerando-se apenas as condições de V_a iguais ou maiores que 5,5 m/min, correspondentes ao regime de transferência por escoamento goticular axial, foram geradas, por regressão linear, as equações representativas da corrente média e período modal de destacamento da gota correspondentes ao arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro, conforme abaixo:

$$I_m = 659.5 - 512.6 * \frac{d_g}{d_e} \quad (7),$$

onde I_m é a corrente média correspondente a um relação entre d_g e d_e , diâmetro de gota e diâmetro de eletrodo, respectivamente. Esta relação apresentou um coeficiente $R^2 = 0,9095$.

$$T_d = 21.443 - 0.0875 * I_m \quad (8),$$

onde T_d é o período modal de destacamento de gota. Esta relação apresentou um coeficiente $R^2 = 0,9996$

Com base nas equações 7 e 8, foram determinados, para o arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro, a corrente de transição, I_t , e o período de destacamento, T_d , correspondentes à condição de gota com diâmetro igual ao diâmetro do arame.

$$I_t = 147(A)$$

$$T_d = 8.6(ms)$$

Estes resultados permitem determinar, através da equação 2, o parâmetro de destacamento, D , para as condições consideradas.

$$D = 829(A^{2,3}.s)$$

6.2.2. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA

Para determinação dos parâmetros e variáveis adequadas à corrente pulsada, considerou-se que a relação entre a corrente média e a velocidade de arame pode ser expressa pela equação:

$$I_m = m * V_a \quad (9)$$

onde I_m é a corrente média;

m é o coeficiente de alimentação de arame, também chamado de fator de fusão e V_a é a velocidade de alimentação do arame.

Identificou-se, inicialmente, para o arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro, a relação entre a corrente média I_m e a velocidade de arame, V_a , com base em regressão linear dos dados da tabela 8. Para a regressão foi fixado o intercepto no 0 (zero) de forma a adequá-la à equação 9. Nesta condição, encontra-se para o coeficiente de alimentação de arame m , um valor de 26,4 A/m/min, resultando na equação:

$$I_m = 26.4 * V_a \quad (10),$$

sendo identificado um coeficiente $R^2 = 0,9887$.

Convém destacar que a regressão linear sem fixar o intercepto em 0, ou seja, considerando um modelo tal que:

$$I_m = a + m * V_a \quad (11),$$

resulta na relação:

$$I_m = -8.7 + 28 * V_a \quad (12),$$

Que apresentou um coeficiente $R^2 = 0,992$.

A equação 12, embora mais precisa, fornece resultados muito próximos aos da equação 1 na faixa de trabalho com corrente pulsada, compreendida entre 70 e 140 A, conforme tabela 11, abaixo:

Tabela 11 - Comparativo entre as equações para corrente média

Va (m/min)	Im=m*Va (A)	Im=a+m*Va (m/min)	diferença %
3	79,2	75,3	4,9
4	105,6	103,3	2,2
5	132	131,3	0,5

Em relação às variáveis da corrente pulsada, a corrente média pode ser expressa pela equação:

$$I_m = \frac{I_p * t_p + I_b * t_b}{t_p + t_b} \quad (13),$$

onde I_p e t_p são, respectivamente, a amplitude e a duração da corrente no pulso; I_b e t_b são, respectivamente, a amplitude e a duração da corrente, na base.

O período T da corrente pulsada pode ser expresso pela equação:

$$T = t_p + t_b \quad (14)$$

A relação entre a corrente média I_m , e a amplitude e duração da corrente de pulso e de base pode ser expressa pela equação 13, permitindo estabelecer o conjunto da variáveis para uma mesma corrente média pré-definida de 70 A, e para uma mesma razão entre diâmetro de gota e de arame, dg/de de 1,098.

Conforme a equação 10, para a corrente média fixada de 70 A, deveria ser imposta uma velocidade de arame de 2,7 m/min, porém nos testes iniciais, verificou-se ser uma velocidade insuficiente, tendo que ser corrigida para 3,1 m/min.

Para manter as condições pré-fixadas de diâmetro de gota e corrente média, o período, T , da corrente pulsada foi ajustado para a condição de velocidade de arame de 3,1 m/min, resultando, conforme a equação 1, em um período de 20,5 ms.

Visando estudar o efeito da corrente de pulso, foi inicialmente determinado o conjunto de parâmetros e variáveis para correntes de pulso de 160 a 300 A, conforme apresentado na tabela 12.

tabela 12 – Conjunto de parâmetros para corrente pulsada

T (ms)	Ib (A)	Tb (ms)	Ip (A)	Tp (ms)	Im (A)	Va (m/min)	Vol. Modal (mm ³)	dg (mm)	dg/de
20,5	22,6	13,4	160	7,1	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	27,2	14,4	170	6,1	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	30,7	15,1	180	5,4	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	36,2	16,3	200	4,2	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	40,2	17,1	220	3,4	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	43,3	17,7	240	2,8	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	45,8	18,2	260	2,3	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	47,9	18,5	280	2,0	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	49,7	18,8	300	1,7	70	3,1	1,198	1,318	1,098

Foram realizados os ensaios com os parâmetros e variáveis acima especificados. Com o auxílio de oscilogramas, foi identificado que os parâmetros e variáveis calculadas não foram adequadas, sendo verificadas situações de destacamento irregular, ou seja, que não resultaram em uma única gota por pulso.

Visando assegurar o destacamento de uma única gota por pulso, foi necessário ajustar os parâmetros e variáveis da corrente de pulso.

Estas mudanças foram conduzidas alterando simultaneamente o tempo de pulso, o tempo de base e a corrente de base, de forma a manter o mesmo diâmetro de gota, a mesma velocidade de arame e a mesma corrente média, o que resultou na tabela 13.

tabela 13 – Conjunto de parâmetros ajustados para corrente pulsada

T (ms)	Ib (A)	Tb (ms)	Ip (A)	Tp (ms)	Im (A)	Va (m/min)	Vol. Modal (mm ³)	dg (mm)	dg/de
20,5	28,2	14,0	160	6,5	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	31,5	14,8	170	5,7	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	34,5	15,5	180	5,0	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	31,3	15,8	200	4,7	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	38,0	16,9	220	3,6	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	37,4	17,2	240	3,3	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	37,4	17,5	260	3,0	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	36,8	17,7	280	2,8	70	3,1	1,198	1,318	1,098
20,5	40,9	18,2	300	2,3	70	3,1	1,198	1,318	1,098

Os experimentos conduzidos, conforme tabela acima, foram executados tanto no sentido empurrando, como no sentido puxando, e analisados quanto ao acabamento resultante Fig. (25 a 36).

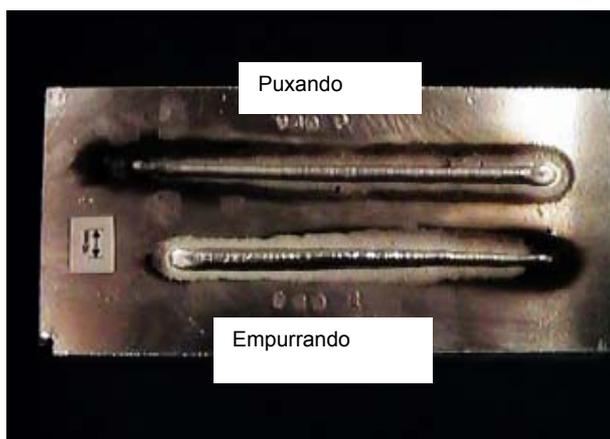


Fig. 25 Cordões de solda com corrente de pulso de 160 A

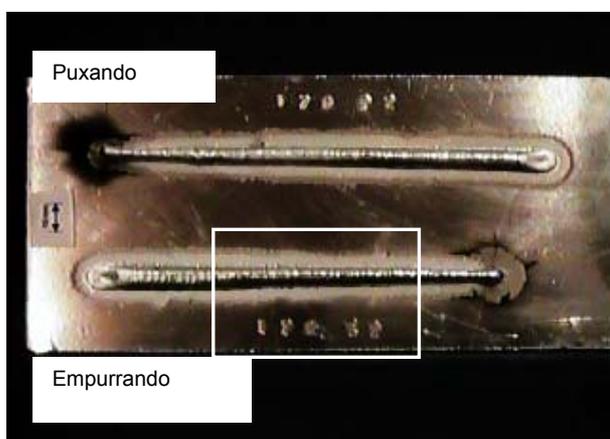


Fig. 26 Cordões de solda com corrente de pulso de 170 A

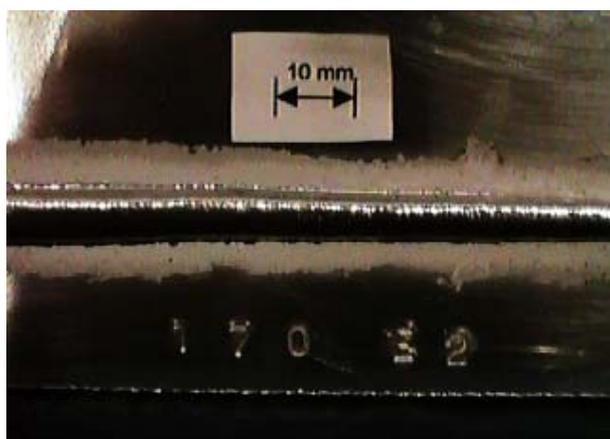


Fig. 27 Ampliação da região marcada na figura 26



Fig. 28 Cordões de solda com corrente de pulso de 180 A

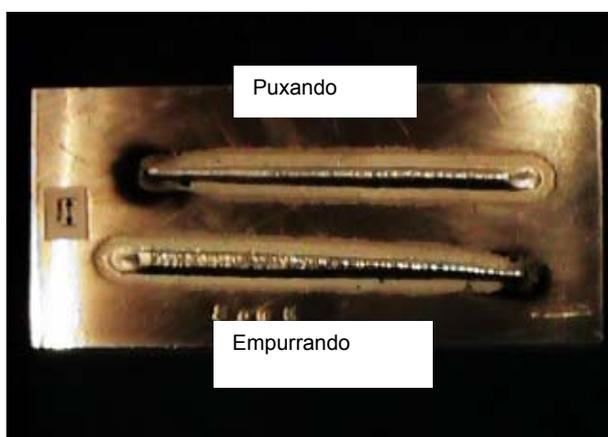


Fig. 29 Cordões de solda com corrente de pulso de 200 A

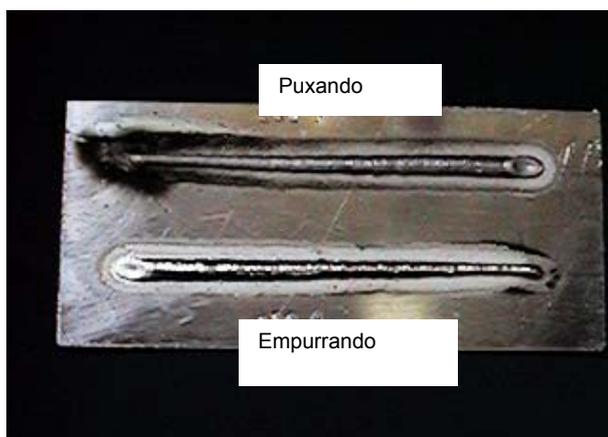


Fig. 30 Cordões de solda com corrente de pulso de 220 A

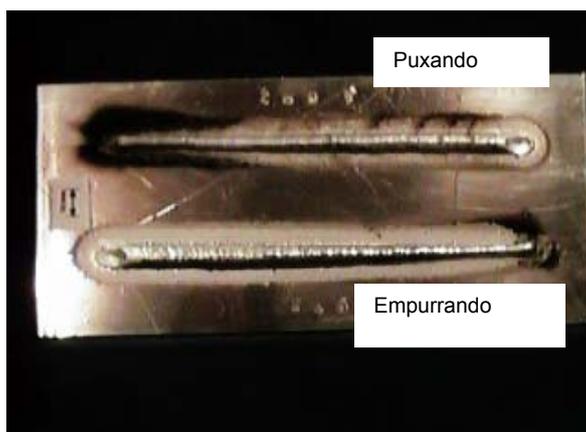


Fig. 31 Cordões de solda com corrente de pulso de 240 A

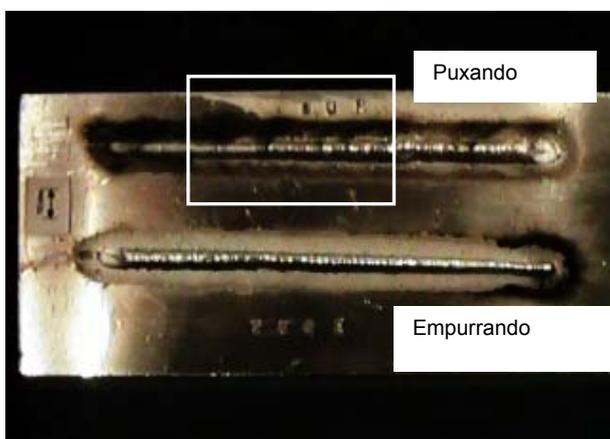


Fig. 32 Cordões de solda com corrente de pulso de 260 A

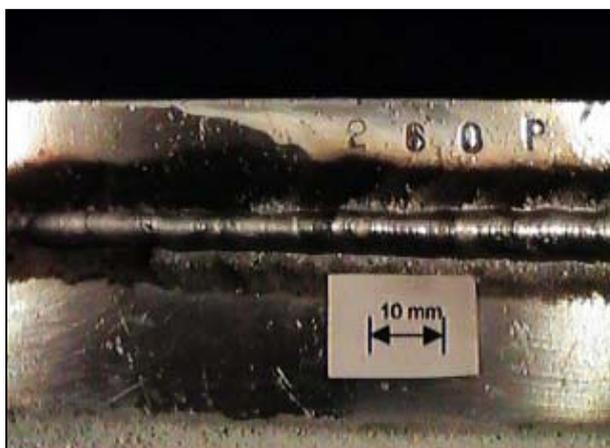


Fig. 33 Ampliação da região marcada na figura 32

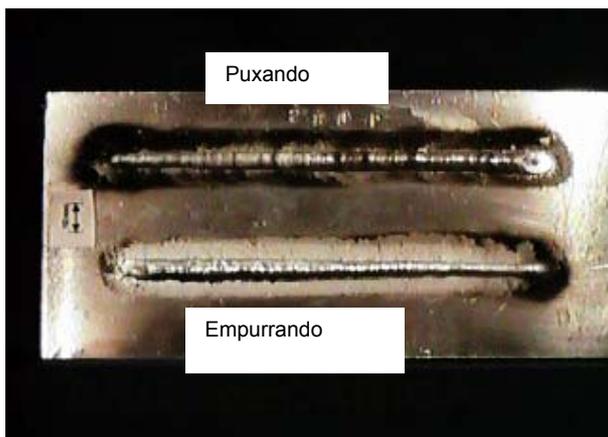


Fig. 34 Cordões de solda com corrente de pulso de 280 A

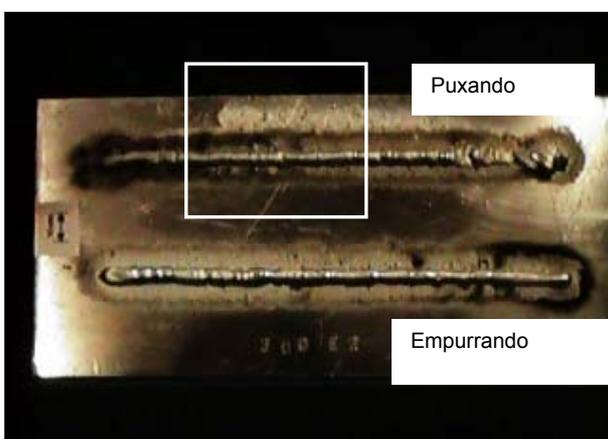


Fig. 35 Cordões de solda com corrente de pulso de 300 A

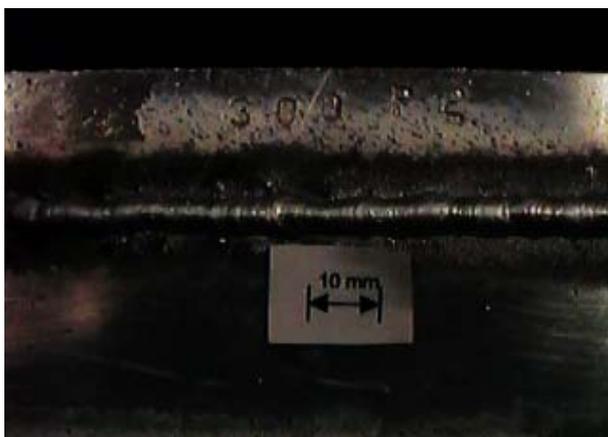


Fig. 36 Ampliação da região marcada na figura 35

Os cordões produzidos com correntes de pulso entre 160 e 200 A , resultaram em um bom acabamento, tanto puxando, como empurrando, sendo observado um elevado grau de limpeza nas proximidades do cordão, sem fuligem, exceto no ponto de abertura do arco.

Correntes de pulso acima de 220 A resultaram, para o conjunto de parâmetros e variáveis ensaiados, em pior acabamento, com ocorrência de respingos e fuligem, sendo mais acentuado o problema no sentido puxando a tocha.

A origem deste fenômeno pode estar associada a um impacto mais forte das gotas na poça de fusão, assim como, a uma maior oscilação da poça, devido a uma pressão de arco mais elevada. Ambos os mecanismos são citados por estarem relacionados a um aumento na corrente de pulso, porém, sem um processo de filmagem de alta velocidade, sincronizado com os oscilogramas de tensão e corrente, não se pode confirmar tais suposições.

Convém registrar que para menores níveis de corrente de pulso, 160 e 170 A, foi mais fácil ajustar os parâmetros e variáveis para obter um bom acabamento, ao contrário dos níveis mais altos.

Após diversos ensaios, inclusive com controle sinérgico de altura de arco, utilizando a corrente de pulso de 160 A , verificou-se que eventualmente não ocorre o destacamento da gota no pulso, mostrando ser uma condição sujeita a falhas por perturbações no processo. Diante deste fato, é conveniente a utilização de corrente de pulso entre 170 e 200 A.

6.3. ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS DE CONTROLE SINÉRGICO DE ALTURA DO ARCO

O programa estruturado para proceder ao controle sinérgico da altura do arco, foi desenvolvido em linguagem turbo pascal, como uma rotina inserida dentro de um comando de repetição.

A lógica do controle sinérgico consistiu das etapas:

- Ler continuamente a tensão e a corrente de soldagem;
- Com base na corrente, identificar se estava no tempo de base ou pulso;
- Caso a corrente seja de base;
- Calcular a média da tensão dos últimos dois períodos de base (U_b);
- Comparar a tensão calculada com um valor referencial;
- Caso a diferença da tensão lida e referencial seja superior a um valor limite, aplicar a equação de correção do tempo de base.

A equação de correção do tempo de base utilizada foi:

$$t_{bc} = (U_b - U_r) * k + t_b \quad (15)$$

onde:

T_{bc} é o tempo de base corrigido (ms)

U_b é a tensão média de base nas últimas duas fases de base (V)

U_r é a tensão de referência, relacionada à altura do arco pretendida (V)

K é a constante que determina a dinâmica da correção

T_b é o tempo de base especificado para o conjunto de parâmetros em uso (ms)

Nos ensaios realizados com corrente imposta e pulsada, operando em regime de transferência por projeção axial, sem controle sinérgico da altura do arco e utilizando gás argônio, verificou-se ausência de auto-controle da altura do arco, ocorrendo a variação de seu comprimento, conforme a variação da distância da tocha à chapa, resultando em um cordão com falha nos pontos de afastamento da tocha (Fig. 37).



Fig. 37 Cordão depositado sobre chapa corrugada, sem controle sinérgico da altura do arco e com imposição de corrente

Os ensaios com modo misto, impondo corrente na base, comandando tensão no pulso e utilizando gás argônio puro, apresentaram um certo auto-controle da altura do arco durante a aproximação da tocha, e extinção do arco no afastamento da mesma. Pode-se verificar, na Fig. 38, as falhas provocadas pela extinção do arco nos pontos de maior afastamento.

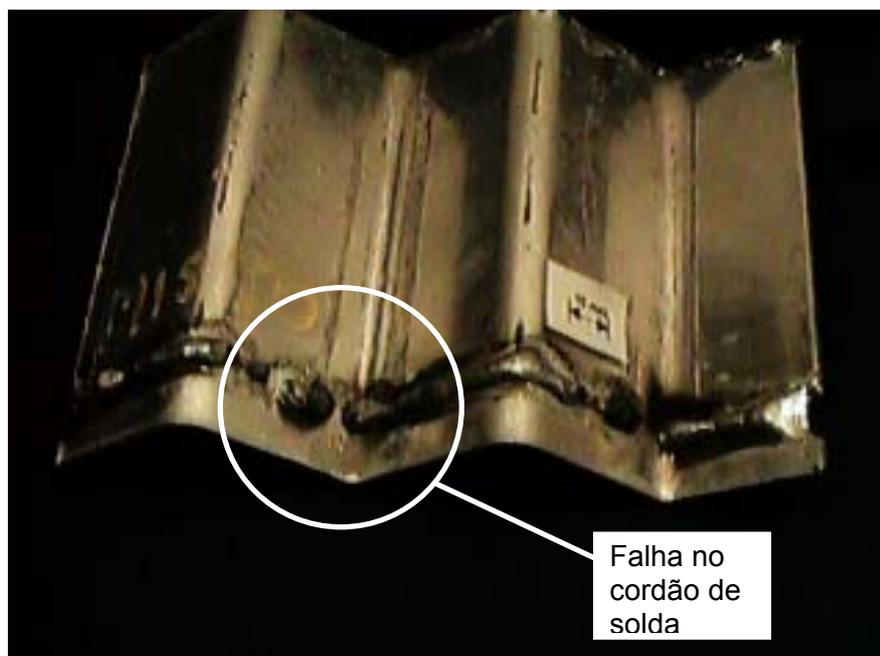


Fig. 38 Cordão depositado sobre chapa corrugada, sem controle sinérgico da altura do arco e comando misto

Nos experimentos com corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, com controle sinérgico da altura do arco e utilizando gás argônio puro, verificou-se um melhor controle da altura do arco, apesar da ocorrência de curto circuito ao longo da soldagem, resultando em um cordão sem falhas porém com irregularidades (Fig. 39).



Fig. 39 Cordão depositado sobre chapa corrugada, com controle sinérgico da altura do arco, imposição de corrente, com gás argônio

Nas mesmas condições anteriores, ou seja, com controle sinérgico, imposição de corrente, em regime de transferência por projeção axial e gás argônio, porém, em chapa plana, verificou-se um razoável controle da altura do arco, embora tenha sido verificada a ocorrência de curto circuito ao longo da soldagem, como pode ser visto nas figuras 40 e 41.

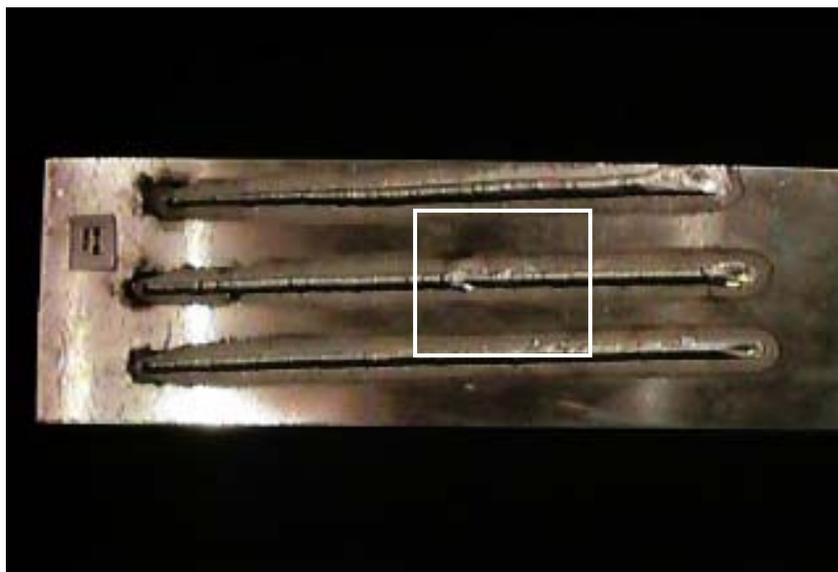


Fig 40 Cordões depositados em chapa plana, com controle sinérgico de altura do arco, imposição de corrente, gás argônio

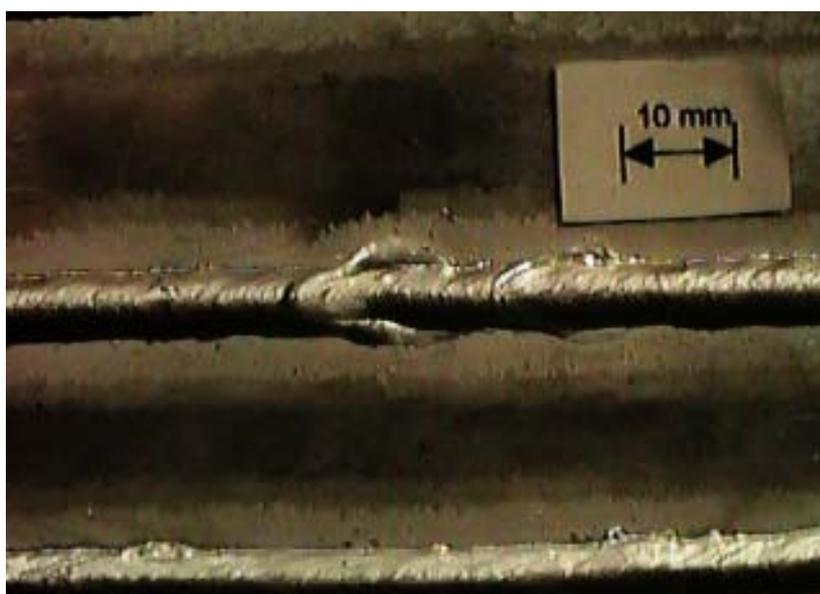


Fig. 41 Ampliação da região marcada na Fig. 40

O espalhamento da poça de fusão decorrente do curto circuito, apresentado na ampliação, parece estar relacionado à fuidéz do alumínio, porém são necessários mais experimentos, acompanhados de filmagem para identificar com clareza o efeito do curto circuito na soldagem MIG do alumínio.

Nos experimentos com corrente imposta e pulsada, em regime de transferência por projeção axial, com controle sinérgico da altura do arco e utilizando mistura de argônio com aproximadamente 0,2% de oxigênio, verificou-se um bom controle da altura do arco ao longo da soldagem, resultando em um cordão homogêneo, embora com fuligem lateral (Fig. 42).



Fig. 42 Cordão depositado sobre chapa corrugada, com controle sinérgico da altura de arco, imposição de corrente e mistura de argônio e oxigênio

Os resultados indicam uma certa coerência na hipótese da flutuação na relação entre a tensão e o comprimento do arco estar relacionada à variação da emissividade da poça, porém os aspectos envolvidos são mais amplos e exigem estudos cuidadosos.

A relação entre a altura do arco e a tensão deve ser estudada com profundidade para fundamentar a técnica de controle sinérgico. Os diversos ensaios sugerem que a composição do gás, a temperatura da chapa e a dimensão da poça de fusão tenham forte influência sobre esta relação.

7. CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES SOBRE A ABERTURA DO ARCO

Considerando-se a geometria da ponta como o principal fator determinante das condições de abertura do arco, e que a ponta do arame arredondada foi identificada como a condição crítica, correntes mais elevadas favorecem uma rápida e segura abertura.

Pode ser dispensado o sistema de interrupção da alimentação do arame para soldagem do alumínio liga 1200 H14 com arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro, utilizando-se corrente de abertura de 440 A e baixas velocidades de aproximação, até 5 m/min.

A altura do arco após a abertura é influenciada pela geometria da ponta, sendo maior quando o arame está com a ponta arredondada. Para executar a soldagem com comprimento de arco adequado faz-se necessário estabelecer um mecanismo que promova o controle de altura do arco após a abertura, eliminando, assim, o efeito da aleatoriedade da geometria da ponta do arame.

7.2. CONCLUSÕES SOBRE OS PARÂMETROS E VARIÁVEIS DA CORRENTE PULSADA

Para soldagem MIG do alumínio 1200H14 com arame ER4043 de 1,2 mm de diâmetro, correntes de pulso entre 160 e 200 A, resultaram em melhor acabamento do cordão depositado e da região próxima a este, sendo observada a melhor condição para corrente de 170 A.

A utilização de correntes de pulso de 160 a 200 A, identificada como uma faixa mais adequada, contrasta com os experimentos de alguns autores [7 e 9]. Cabe ressaltar que, ao contrário destes autores, a técnica da corrente pulsada foi aplicada para correntes médias abaixo da corrente de transição, faixa de operação adequada à corrente pulsada.

Os ensaios mostram que, utilizando corrente de pulso entre 160 e 200 A, a soldagem, tanto no sentido puxando como empurrando, apresenta bom de acabamento superficial. Para correntes de pulso acima de 200 A, os ensaios mostram que a soldagem no sentido empurrando resulta em melhores condições de acabamento.

São necessários mais ensaios acompanhados de filmagem em alta velocidade, sincronizada com a monitoração da corrente e tensão, para esclarecer o comportamento do alumínio durante o destacamento de gotas com corrente pulsada.

7.3. CONCLUSÕES SOBRE O CONTROLE SINÉRGICO DE ALTURA DO ARCO

O controle sinérgico de altura de arco é possível de ser implementado para o alumínio, porém exigirá estudos mais profundos para estabelecer um indicador confiável da altura do arco.

O controle implementado, ainda que deficiente, apresentou melhores resultados quanto ao acabamento do cordão que os processos sem controle sinérgico, tanto com imposição de corrente como comando misto, sistemas estes, disponíveis nos equipamentos mais usuais para soldagem MIG do alumínio.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando o aprimoramento do controle sinérgico de altura do arco, aplicado ao alumínio, deve-se considerar a necessidade de novos estudos sobre a influência da composição do gás de proteção sobre a relação entre a tensão e o comprimento do arco.

A aplicação da técnica do controle sinérgico de altura do arco deve ser estudada para outros materiais, em especial aços inoxidáveis, e processos de soldagem automatizados.

Objetivando uma melhoria da qualidade do cordão depositado e dos aspectos metalúrgicos envolvidos na soldagem do alumínio, analogamente à técnica da pulsação térmica utilizada na soldagem TIG, onde a corrente média varia ao longo da soldagem, novos estudos, utilizando esta técnica podem ser aplicados ao processo MIG do alumínio.

Face às dificuldades de soldagem do alumínio, sobretudo devido à sua elevada condutibilidade térmica, são necessários novos estudos para reduzir principalmente problemas de variação de penetração ao longo da soldagem. Estes estudos podem envolver o controle sinérgico da soldagem, com base na monitoração constante da temperatura do metal de base.

ANEXO - HISTOGRAMAS DOS PERÍODOS DE DESTACAMENTO DE GOTA

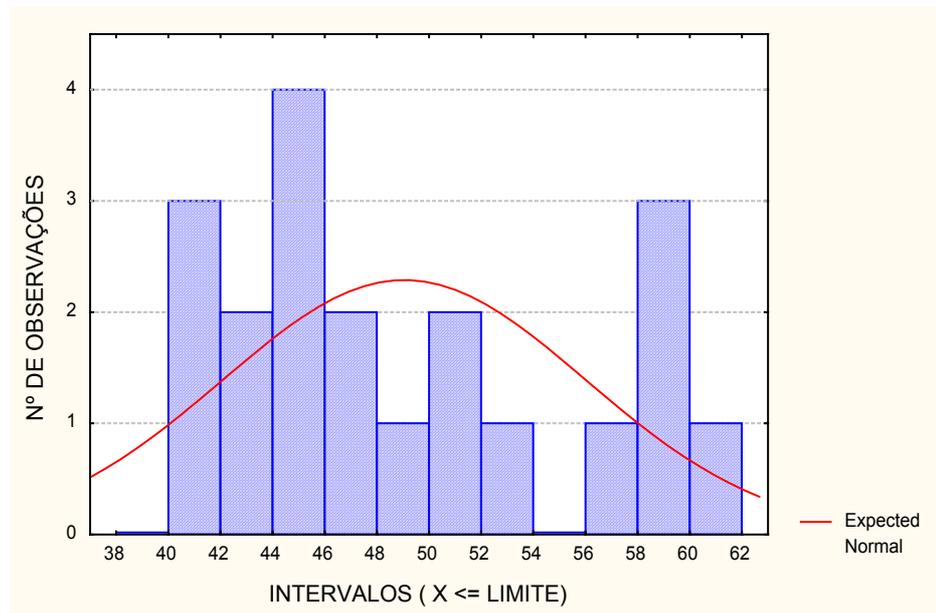


Fig. A1 Histograma correspondente a velocidade de arame de 4

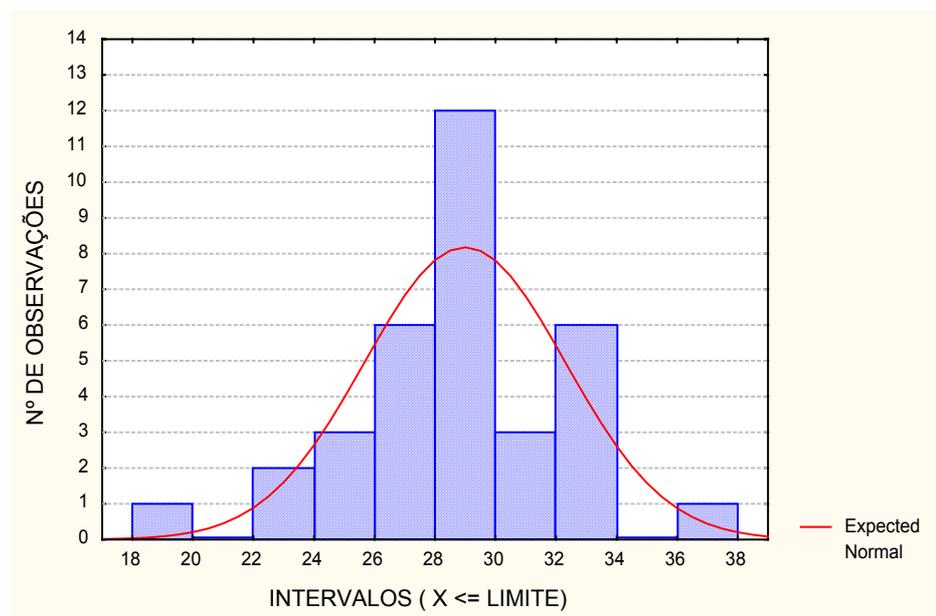


Fig. A2 Histograma correspondente a velocidade de arame de 4,5 m/min

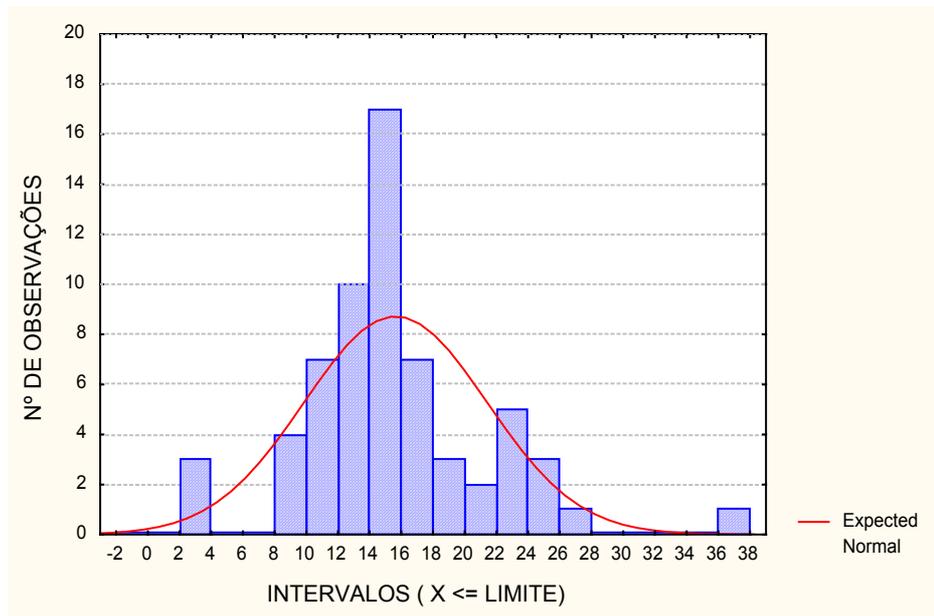


Fig. A3 Histograma correspondente a velocidade de arame de 5 m/min

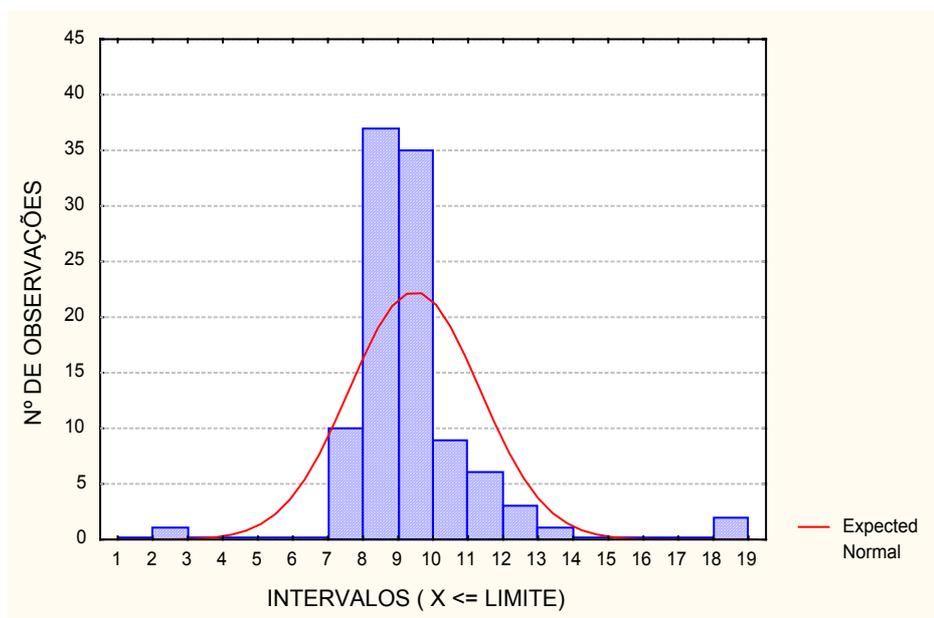


Fig. A4 Histograma correspondente a velocidade de arame de 5,5 m/min

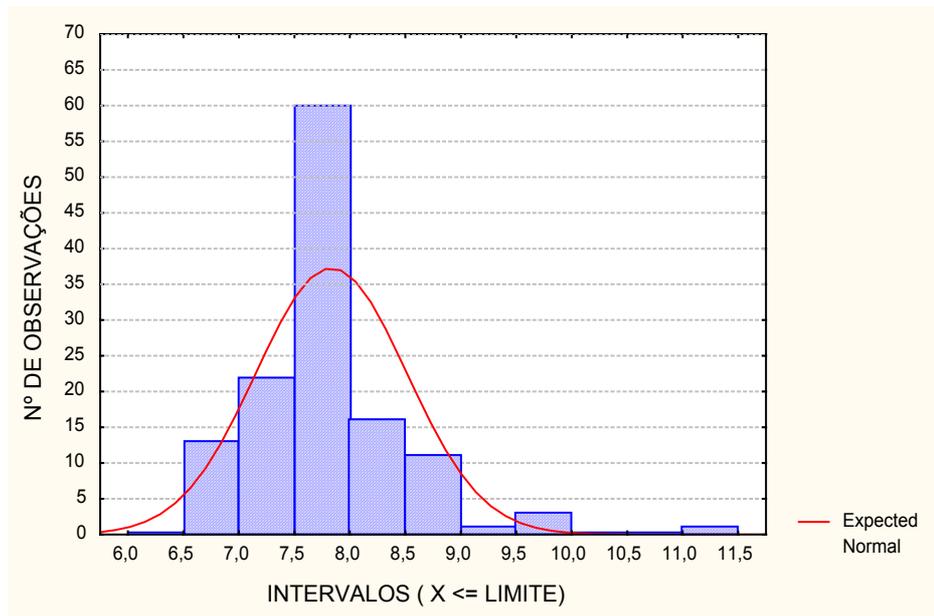


Fig. A5 Histograma correspondente a velocidade de arame de 6 m/min

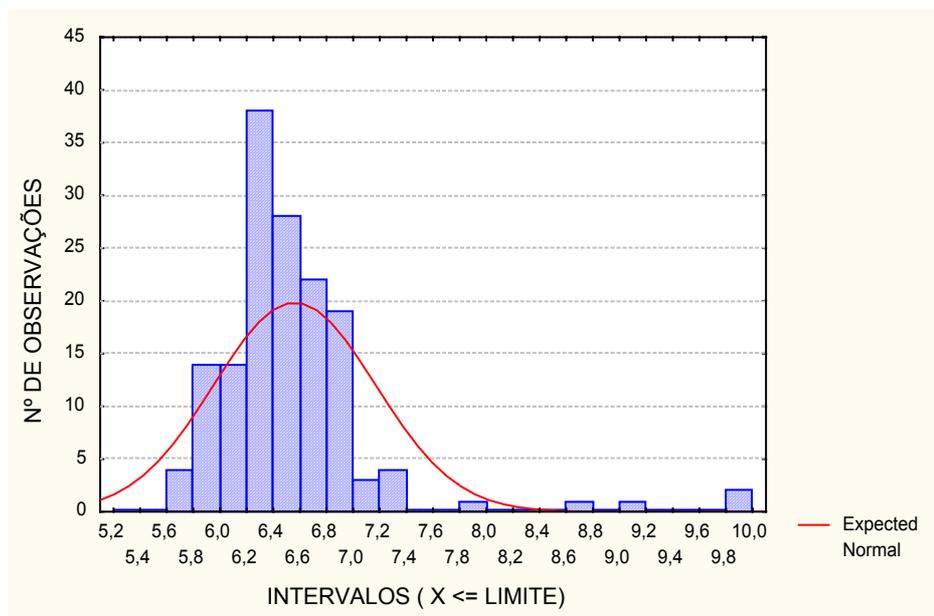


Fig. A6 Histograma correspondente a velocidade de arame de 6,5 m/min

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] – Ryan P. Tips on welding aluminum with the GMAW process. Welding Journal, December 1988.
- [2] - Altshuller B. A guide to GMA welding of aluminum. Welding Journal, June 1998, 49-55.
- [3] – Azevedo, C.W. P.; Macedo, W. A.; Paula, D. A.; Faria, R. V. Soldagem MIG do alumínio – uma análise da adequação de diferentes fontes de energia sob o ponto de vista qualidade e produtividade – parte 1 (a). XV ENTS, ABS 1988, 549-559.
- [4] – Devletian, J. H.; Wood, W. E. Factors affecting porosity in aluminum welds – a review. Welding Research Council, 1984.
- [5] – Farson, D. , Conrardy, C. , Talkington, J. , Baker, K. , Kerschbaumer, T. and Edwards, P. ; Arc Initiation in Gas Metal Arc Welding, Welding Journal, agosto 1998, 315-321.
- [6] – M. Amin. Prediction of square wave pulse current parameters for control of transfer in MIG welding. Welding Institute, dezembro de 1978.
- [7] – S. Subramaniam; D. R. White; J. E. Jones; D. W. Lyons. Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW. Welding Journal, maio de 1999.
- [8] – Dutra, J. C. Procedimento computadorizado de determinação, seleção e controle de variáveis na soldagem MIG/MAG. Florianópolis, 1989. Tese – Engenharia Mecânica, UFSC.
- [9] – Klauss-Jürgen Matthes; Mario Kusch; Chemnitz; Helmut Roth; Steffen Müller; Frank Wüst, Fellbach. Regelverhalten von Impulsstromquellen zum Metall-Schutzgasschweißen bei Veränderung des Kontaktrahabstands. Schweißen & Schneiden, setembro de 1999.