



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Departamento de Engenharia Mecânica

Curso de Engenharia de Materiais

Laboratório de Soldagem e Mecatrônica - LABSOLDA



Relatório de Estágio Curricular V

Período: 16/05/2016 à 09/09/2016

Pedro Correa Jaeger Rocha

11204234

“Concordamos com o conteúdo do presente relatório. ”

Orientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis, 07/09/2016



LABSOLDA - Instituto de Soldagem e Mecatrônica
Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica - Bloco B
Campus Universitário, Trindade - Florianópolis - SC
CEP: 88040-900 - Caixa postal: 476
Fone: +55 (48) 3721-9471 / +55 (48) 3234-6516
Fone/Fax: +55 (48) 3234-2783

SUMÁRIO

1. AGRADECIMENTOS	5
2. INTRODUÇÃO.....	6
2.1 MOTIVAÇÃO	6
2.2 OBJETIVOS	7
2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	8
3.1.1 Princípios de operação	9
3.1.2 Principais vantagens e limitações	10
3.2 FÍSICA DO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO	11
3.3 APLICAÇÃO DA TOCHA MA-400 SPIN ARC.....	12
3.3.1 Revestimento por soldagem	12
3.3.2 Preenchimento de junta em união de dutos	13
4. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4.1 EQUIPAMENTOS	14
4.1.1 Tocha de soldagem MA-400 Spin Arc.....	16
4.2 MATERIAIS.....	18
5. PROCEDIMENTO.....	19
5.1 MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO.....	19
5.2 MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EFETIVO DE GIRO	20
5.3 MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	23
5.4 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE TANGENCIAL	25
5.5 DESENVOLVIMENTO DE PARÂMETRO DE SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO DE CHAPA METÁLICA NA POSIÇÃO PLANA COM MATERIAL DE ADIÇÃO INCONEL 625 (AWS ERNCRMo-3)	26
6. RESULTADOS	28
6.1 MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO.....	28

6.2	MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EFETIVO DE GIRO	28
6.3	COMPARAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE TRANSFERÊNCIA E VELOCIDADE TANGENCIAL DA GOTA	
	28	
6.4	DESENVOLVIMENTO DE PARÂMETRO DE SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO DE CHAPA METÁLICA	
	NA POSIÇÃO PLANA COM MATERIAL DE ADIÇÃO INCONEL 625 (AWS ERNiCrMo-3)	29
7.	CONCLUSÃO	31
8.	ANEXOS	32
8.1	ANEXO I – HISTÓRICO DA EMPRESA	32
8.2	ANEXO II – PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA REVESTIMENTO EM INCONEL 625. FORNECIDO	
	PELA EMPRESA DESENVOLVEDORA DA TOCHA MA-400: WELDING REVOLUTION	33
9.	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	34
10.	BIBLIOGRAFIA	35

1. Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Instituto de Soldagem e Mecatrônica Labsolda pela oportunidade de pesquisar e desenvolver este trabalho em tão elevado nível.

Ao meu coordenador, Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva pela sua supervisão, suporte e especialmente pela confiança depositada em mim para realizar tal atividade.

A equipe do Labsolda que me ajudou diariamente e sem a qual não seria capaz de realizar com tal qualidade esse trabalho.

Gostaria de citar também o trabalho da coordenação de estágio de engenharia de materiais, Prof. Orestes Alarcon e Eng. Pablo Junges sem a qual esse estágio não seria possível.

E a todos que contribuíram para tornar esse trimestre uma fase de grande crescimento em minha vida.

Muito obrigado!

2. Introdução

O presente relatório trata das atividades realizadas pelo estagiário na função de pesquisador graduando na equipe de pesquisa e desenvolvimento no laboratório de mecatrônica e soldagem Labsolda.

Esse relatório refere-se ao período de estágio 2016-2 e engloba o trabalho realizado no período de 16 de maio de 2016 até 09 de setembro de 2016, data de término do período de estágio. Durante esses 4 meses como coordenador de um projeto o estagiário desempenhou diversas atividades no âmbito da engenharia. As mais relevantes serão apresentadas nesse relatório.

O projeto coordenado totalmente pelo estagiário e que leva o título deste trabalho é “Processo de soldagem MIG/MAG com tocha de soldagem MA-400 Spin Arc”.

2.1 Motivação

O ritmo crescente de globalização aproxima cada vez mais culturas, mercados e modos de produção. Essa aproximação facilitou a divulgação do conhecimento, porém fomentou a concorrência industrial com a presença de multinacionais, muitas vezes esmagando o crescimento tecnológico nacional. Concomitantemente surge o apelo pelo desenvolvimento sustentável, nova mentalidade industrial focada na utilização controlada dos recursos naturais.

Uma das maneiras de fortalecer a indústria nacional de maneira sustentável é o aprimoramento dos processos de alta produtividade, ou seja, processos que agregam valor ao produto com o menor custo possível. O presente trabalho segue essa linha de raciocínio quando estuda a inovação incremental do processo MIG/MAG, o qual já é considerado o processo mais robusto e de maior aceitação na indústria.

2.2 Objetivos

De acordo com a motivação do trabalho, foram propostos três objetivos julgados suficientemente pertinentes à geração de conhecimento esperada para esse nível de trabalho.

Os objetivos são listados a seguir:

1. **Investigar as especificações da tocha MA-400 Spin Arc e verificar sua reprodutibilidade.**
2. **Analisar a influência da rotação do arame eletrodo na transferência metálica.**
3. **Desenvolver um parâmetro de soldagem para revestimento de chapa metálica na posição plana com material de adição Inconel 625 (AWS ERNiCrMo-3)**

O objetivo 1 busca, primeiramente, confirmar as especificações do desenvolvedor da tocha MA-400, fator primordial na validação dos posteriores resultados obtidos. Para entendermos melhor os fenômenos físicos que ocorrem com a adição da variável rotação na soldagem MIG/MAG, se fez necessário primeiramente analisar a dinâmica da transferência metálica nessa situação, fato que justifica, portanto, o objetivo 2. Já o objetivo 3 busca repetir especificações de procedimento de soldagem fornecidas pelo desenvolvedor da tocha de soldagem MA-400 Spin Arc.

2.3 Estrutura do trabalho

Esse trabalho está organizado da maneira a seguir. O capítulo 3 apresenta uma breve revisão sobre o processo de soldagem MIG/MAG convencional do qual derivou o processo aqui abordado. O mesmo capítulo também relembra alguns preceitos físicos pertinentes para leitura do trabalho e, finalmente, aborda possíveis aplicações em que a tocha MA-400 seria indicada.

Já o capítulo 4 explica o funcionamento da tocha MA-400, mostra os equipamentos usados para a construção da bancada de testes.

Em seguida, os procedimentos realizados para a validação dos objetivos são apresentados no capítulo 5 e posteriormente encontra-se os resultados e conclusões do trabalho nos capítulos 6 e 7 respectivamente.

3. Revisão bibliográfica

No presente capítulo serão apresentadas as informações pertinentes no auxílio do bom entendimento deste trabalho. Primeiramente, faz-se uma abordagem geral do processo de soldagem MIG/MAG do qual deriva a inovação aqui apresentada. Em seguida, relembra-se a física do movimento circular uniforme. Por fim, se expõe exemplos nos quais a tecnologia SpinArc poderia ser aplicada mostrando sua real importância no cenário industrial.

3.1 Processo de Soldagem MIG/MAG

O processo leva a sigla MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas). Sua principal característica é a alimentação contínua e mecanizada de metal em forma de arame. Na extremidade do arame é gerado um arco elétrico com energia suficiente para alcançar a fusão e consequentemente ocasionando a deposição do metal fundido na peça. (Connor, et al., 1991)

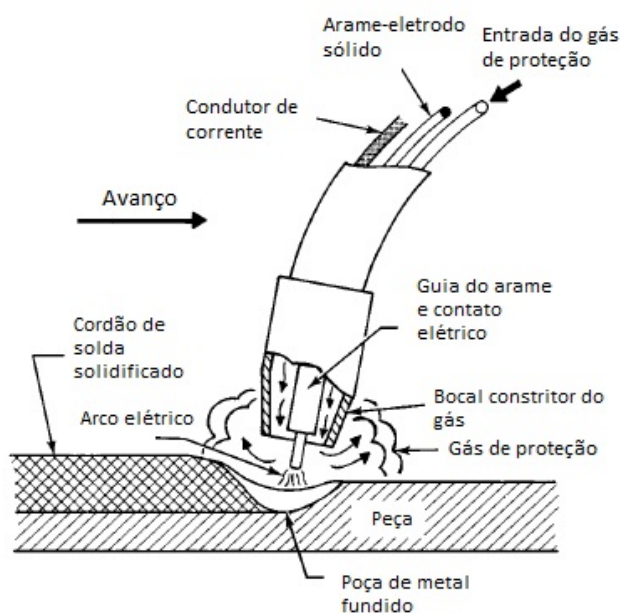


Figura 1: Representação de tocha MIG/MAG e seus elementos durante a soldagem.

O arco elétrico é gerado devido à ionização do gás que é insuflado ininterruptamente em torno do arame como mostra a figura 1. Esse gás é dito protetivo, pois, além de permitir a passagem de corrente elétrica entre o eletrodo e a peça, evita a contaminação tanto das gotas de metal que são transferidas para a peça quanto da poça de metal fundido que se depositou. Quando o gás de proteção é inerte (*Argônio*, e.g.) o processo é chamado de MIG, no caso de gás ativo ou mistura de gases ativos e inertes (*Argônio+CO₂*, e.g.) o processo é chamado MAG.

Outra denominação comumente utilizada do processo é GMAW: Gas Metal Arc Welding. (Carvalho, 2015)

3.1.1 Princípios de operação

Um motor traciona o arame bobinado por um conduíte até a extremidade final da tocha de soldagem. Existe uma diferença de potencial elétrico entre o arame e a peça que se deseja soldar. Essa tensão é gerada artificialmente pela fonte de soldagem, na qual se modificam os parâmetros elétricos como, por exemplo a corrente elétrica imposta. Com o avanço do arame (cátodo) em direção à peça (ânodo) ocorre o aumento do campo elétrico entre os dois eletrodos. A atração dos elétrons da ponta do arame à peça, devido à diferença de potencial elétrico gerada pela fonte de soldagem, cresce até que ocorra a quebra da rigidez dielétrica do gás de proteção que está entre os eletrodos. Ao vencer o isolamento elétrico do gás tem-se um condutor elétrico gasoso. Portanto o gás de proteção também atua como gás ionizante. A quebra da rigidez dielétrica é percebida como a abertura de um arco elétrico, que pode ser entendido como uma série de descargas elétricas entre o cátodo e o ânion.

Temos na figura 2 uma bancada de soldagem genérica apresentando os equipamentos fundamentais para que o processo acima citado ocorra.

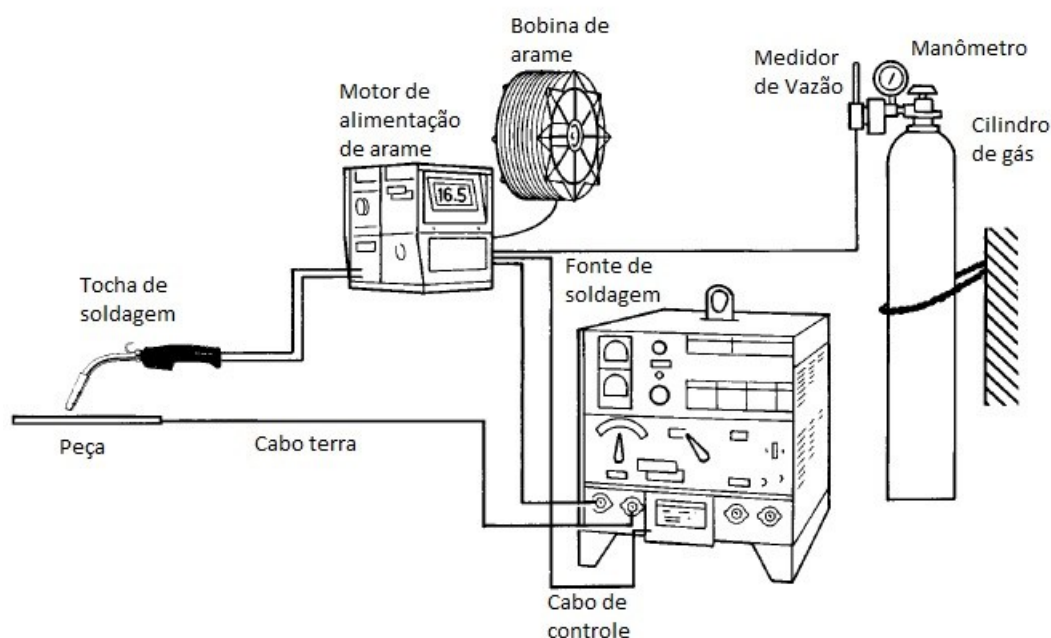


Figura 2: Sistema simplificado do processo de soldagem MIG/MAG

A bancada e os equipamentos utilizados neste trabalho são apresentados no capítulo 4.

3.1.2 Principais vantagens e limitações

Devido sua versatilidade o processo MIG/MAG é o processo mais utilizado na indústria mundial. Suas maiores vantagens segundo (Connor, et al., 1991) são:

- 1. É eficiente em relação aos seus materiais consumíveis e pode ser usado para uma variada gama de metais;**
- 2. Pode ser aplicado em qualquer posição de soldagem respeitando as variações de parâmetros;**
- 3. As taxas de deposição de material bem como a velocidade de soldagem costumam ser significativamente superiores aos demais processos.**
- 4. Sua principal vantagem é sua robustez. Aceita consideráveis desvios nos parâmetros e continua atuando com aceitável qualidade. Esse é um dos fatores que faz o processo um dos mais utilizados em produção de larga escala na qual pequenos desvios de qualidade são absorvidos.**
- 5. Devido à tal robustez é facilmente aprendido pelos operadores manuais bem como tem fácil mecanização e automatização.**

Entretanto o processo MIG/MAG também tem suas limitações (Connor, et al., 1991). Algumas são listadas a seguir:

- 1. Os equipamentos não são tão portáteis, portanto restringem o uso em trabalhos de campo. A própria dimensão da tocha de soldagem e a necessidade de proteção gasosa se torna um limitante para atuação em regiões de difícil acesso. Nessas condições o processo com eletrodo revestido se mostra mais vantajoso.**
- 2. O arco de soldagem deve estar protegido de correntes de ar acima de 5 km/h o qual pode dispersar a proteção gasosa. Tal fato limita o uso em ambiente abertos.**
- 3. Outra limitação envolve o relativo alto nível de calor radiado e intensidade luminosa do arco. Fatores que continuam para a resistência por parte dos operadores em aceitar o processo.**

3.2 Física do movimento de rotação

A rotação pode ser descrita como um movimento de um objeto que gira em torno de um eixo. Analisaremos o caso em que o objeto é considerado um corpo rígido e o eixo será fixo.

Como o objeto está girando é conveniente medir sua posição de forma angular. "A posição angular de um corpo é o ângulo em graus ou revoluções pelo qual um ponto ou linha foi girado em torno de um eixo específico de rotação." (Lardner, 1972)

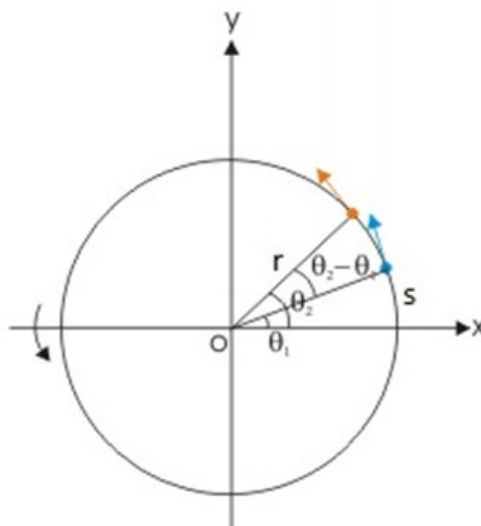


Figure 3: Ponto movendo-se com eixo fixo sobre a origem de um plano cartesiano.

A posição angular como podemos ver na figura 3 é dada em θ e medida em radianos conforme a seguinte fórmula:

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (1)$$

O deslocamento angular, por exemplo quando o corpo varia da posição θ_1 para θ_2 é dado por:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (2)$$

Agora suponha que um corpo em rotação está na posição angular θ_1 no instante t_1 e na posição angular θ_2 no instante t_2 . Definimos velocidade angular instantânea do corpo no intervalo Δt :

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

As equações acima são válidas para todas as partículas do corpo, uma vez que as distâncias relativas são mantidas fixas (Walker, 2002). No SI é medido em radianos por segundo, porém nesse trabalho será usado a unidade de medida rotação por minuto (rpm).

3.3 Aplicação da tocha MA-400 Spin Arc

A tocha de soldagem MA-400 foi desenvolvida principalmente para aplicação de revestimento e preenchimento de juntas na união de dutos. Segue uma breve descrição destas aplicações.

3.3.1 Revestimento por soldagem

O processo de revestir a superfície de uma peça feita com material de nobreza inferior à camada revestida é uma técnica muito utilizada. Com esse artifício pode-se obter não só economia pela diferença de valor entre os materiais, mas também combinar diferentes propriedades químicas e físicas entre superfície e interior de uma peça como explica (Silva, 2010). A figura 4 mostra um exemplo de peça no qual foi realizado revestimento por soldagem.

A figura 5 mostra um corte transversal e uma vista superior de um mesmo revestimento realizado com a tocha MA-400 Spin Arc.



Figura 4: Peça com revestimento metálico por processo de soldagem. (Taskmaster-inc, 2016)



Figura 5: Revestimento realizado pela tocha MA-400 sobre uma chapa de aço. Percebe-se diluição muito baixa e boa qualidade superficial dos cordões. (Weld Revolution, 2015)

3.3.2 Preenchimento de junta em união de dutos

Resumidamente pode-se dizer que a maneira mais eficiente de se transportar grandes volumes fluidos como o petróleo e gás é pelo meio de dutos. Existe uma grande responsabilidade na construção dos mesmos pois um vazamento gera danos catastróficos. Na construção dos dutos é feita a união de seções de dutos por meio de soldagem como mostra a figura 5 e 6.



Figura 6: Seções de dutos (Hebei Meide Steel Pipe, 2016).



Figura 7: União das seções em campo por meio de soldagem.

Nesse contexto a tocha MA-400 Spin Arc segundo seus desenvolvedores traria maior velocidade de produção pois reduziria a necessidade de preparação da junta mesmo assim garantindo penetração lateral superior ao que se obtém com processos ditos convencionais. As figuras 8 e 9 mostram um corte longitudinal da superfície preparada para a soldagem entre duas seções de dutos. Na figura 8 há uma representação da dinâmica do giro do arame no interior na junta enquanto a figura 9 mostra a junta já totalmente preenchida.

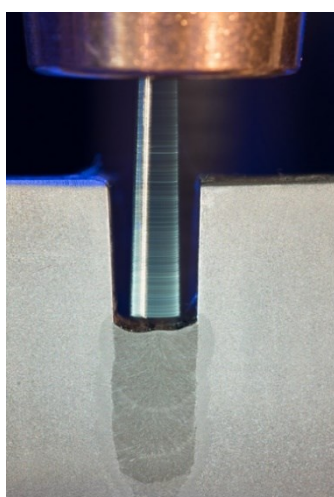


Figura 8: Macrografia de preenchimento de união de duto feito com a tocha MA-400. (Weld Revolution, 2015)

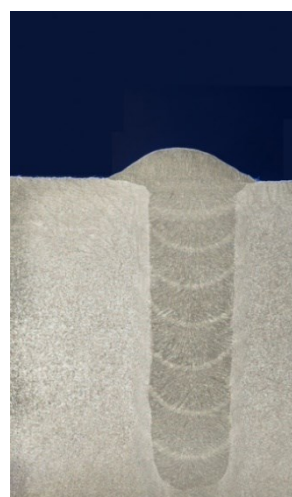


Figura 9: Macrografia do resultado final do preenchimento. (Weld Revolution, 2015)

4. Equipamentos, materiais e métodos

A seguir apresenta-se os equipamentos, materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do presente relatório.

4.1 Equipamentos

Além da tocha de soldagem MA-400, assunto principal deste trabalho, toda estrutura básica para se soldar foi necessária para a realização dos ensaios. Portanto uma bancada de soldagem foi montada como mostra a figura 10 e suas marcações.



Figura 10: Bancada de soldagem.

1. *Conjunto fonte de soldagem IMC Digiplus A7 e cabeçote alimentador de arame.*
2. *Cilindros de gás (Argônio e Dióxido de Carbono) com misturador de gases binário.*
3. *Movimentador cartesiano Tartílope V2.*

4. *Tocha de soldagem Weld Revolution MA-400 Spin Arc.*
5. *Mesa metálica de apoio.*
6. *Controlador de rotação Spin Arc.*

Foi utilizado além dos equipamentos mostrados na figura 10 uma câmera de alta velocidade com sistema de filtro e iluminação a Laser para gerar imagens que não são ofuscadas pela alta intensidade luminosa do arco elétrico como mostrado na figura 11.



Figura 11: Filmagem em alta velocidade com iluminação a LASER.

Além disso foi utilizado uma câmera filmadora comercial de alta resolução para realizar os ensaios de medição de diâmetro de giro efetivo.

Para a medição de velocidade de rotação, transferência metálica e diâmetro de giro foi utilizado o software livre *Tracker: Video analysis and modeling tool*. Disponibilizado gratuitamente por Douglas Brown. (Brown, 2016)

4.1.1 Tocha de soldagem MA-400 Spin Arc



Figura 12: Tocha MA-400 Spin Arc. Dimensões: 300mm do bico de contato até a base. Diâmetro maior de 44mm. (Weld Revolution, 2015)

A simplicidade do funcionamento da tocha MA-400, figura 12, é o seu principal atrativo. Um motor elétrico gira o eixo principal. Devido à excentricidade entre o eixo do motor e o secundário mostrado na figura 13 o movimento é passado até a ponta do arame. A rotação acontece de maneira cônica devido a ligação dos dois eixos por um mancal flexível e o pivotamento exercido por uma mola plana em forma de arruela. A arruela flexível além disso garante o amortecimento do movimento.



Figura 13: Conjunto eixo secundário/ bico de contato com extensor.
A mola plana feita em cobre é fixada no eixo secundário.



Figura 14: Pivô. Mola plana em liga de Cobre. Permite movimento de rotação cônico do eixo agindo também como amortecedor do sistema.

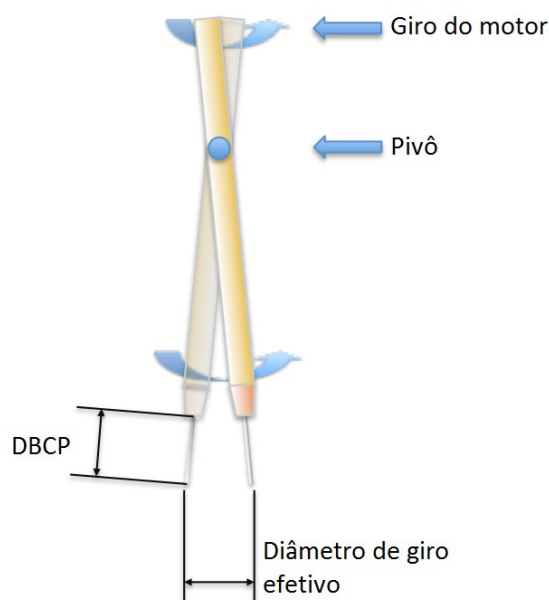


Figura 15: Representação do movimento de giro demonstrando a variação do diâmetro de giro conforme a dimensão do eixo bem como a excentricidade entre eixos definida. DBCP= Distância bico de contato peça. (Weld Revolution, 2015)

Um mancal flexível permite que o movimento de rotação gerado pelo motor elétrico seja passado para a ponta do arame de forma suave e confiável. O mancal pode ser visto na figura 16. Acima do mancal existe 8 posições ajustáveis que variam o diâmetro de giro na ponta do arame. Ao trocar de uma posição para outra muda-se a excentricidade entre os eixos e, deste modo, o diâmetro de giro efetivo. Embora as marcações indiquem uma diferença de 1mm no diâmetro de giro essa variação não é observada experimentalmente como será abordado mais à frente na seção 5.3.

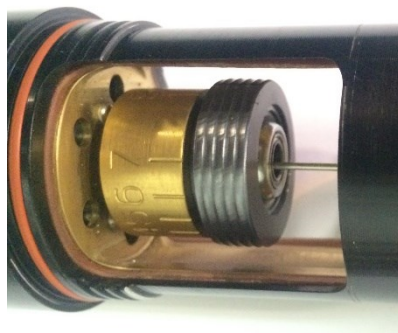


Figura 16: Mancal flexível com regulagem de excentricidade.

Para melhor entendimento do conjunto a figura 17 traz uma visão geral da tocha MA-400 com a retirada de sua carcaça externa expondo o motor e o sistema de mancal flexível-eixos-pivô. O motor elétrico encontra-se no meio da tocha, protegido por uma estrutura não removível.



Figura 17: Tocha MA-400 sem suas proteções estruturais.

4.2 Materiais

Os materiais utilizados na realização dos ensaios foram os seguintes:

1. *Mistura de gás de proteção: Argônio + 2% CO₂*
2. *Material de adição: Arame 1,2mm Inconel 625*
3. *Corpo de prova: Barras de aço 1020 de espessura ¼" e ½".*

5. Procedimento

5.1 Medição de velocidade de rotação

O primeiro teste realizado para aferir as especificações da tocha MA-400 foi o da velocidade de rotação. O intuito foi saber se a velocidade de rotação mostrada no controlador era confiável. A figura 18 traz uma imagem do controlador e suas funcionalidades.

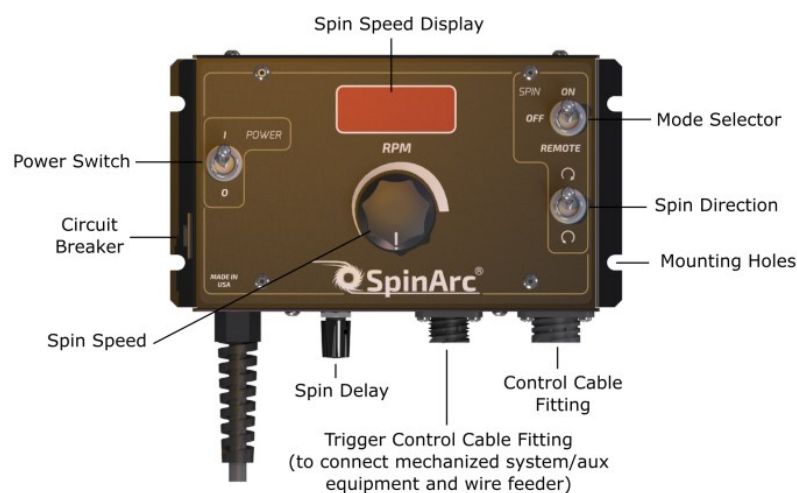


Figura 18: Controlador de velocidade ligado a tocha MA-400.
(Weld Revolution, 2015)

Com base nos vídeos de alta velocidade foi possível definir o tempo de uma rotação completa e, portanto, encontrar a velocidade angular em rotações por minutos. A figura 19 mostra um frame do vídeo e as marcações de apoio para definir os marcos cartesianos de rotação. Foram feitas pelo menos três medições para cada velocidade nominal. Os resultados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Velocidade nominal x Medição experimental (média)

Nominal	Experimental
1000	1054,6
2000	2023,7
3000	3007,5
4000	3998,6
5000	4987,4

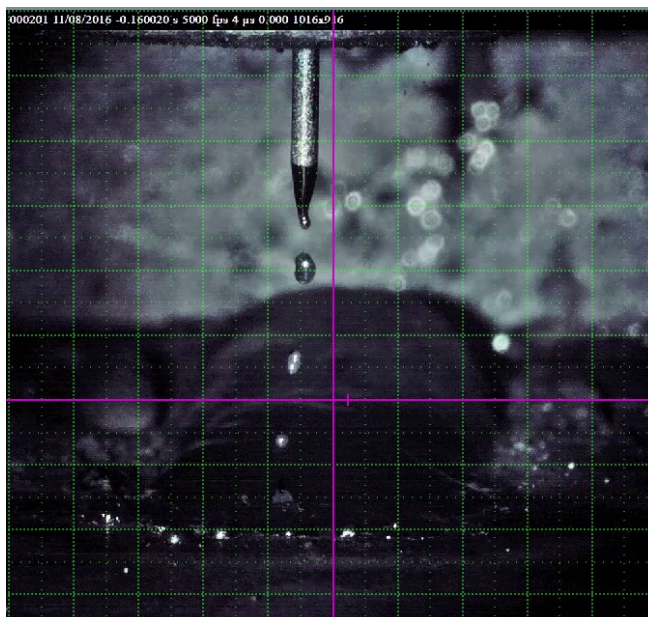


Figura 19: Frame de vídeo de alta velocidade mostrando a dinâmica do giro e a transferência metálica.

5.2 Medição de diâmetro efetivo de giro

O segundo ensaio realizado buscava medir o diâmetro efetivo de giro, ou seja, sob qual diâmetro a ponta do arame estava seguindo em sua trajetória. Essa informação é vital para a parametrização do procedimento de soldagem pois o giro do arame reflete na geometria final do cordão de solda, na dinâmica de solidificação da poça, dissipação do calor, etc.

A medição do diâmetro efetivo de giro foi feita por meio de análise gráfica pois entendeu-se ser o meio mais confiável para tal. A empresa desenvolvedora indica o uso de um calibre de medição, como um paquímetro, e que o diâmetro seja medido pela sensibilidade do operador em perceber quando a parte externa do arame em rotação encosta levemente na superfície do paquímetro (Weld Revolution, 2015). Tal método é deveras impreciso, portanto decidiu-se pela não utilização desta técnica. A figura 21 mostra uma das medições feitas com o auxílio do software Tracker. A distância entre o bico de contato e a peça foi fixada em 25 mm e utilizada como escala para a medição do diâmetro como mostram as figuras 20 e 21.

Ao medir-se o diâmetro efetivo notou-se uma diferença considerável entre os valores especificados e os resultados obtidos. Os resultados experimentais estavam aproximadamente 2 mm abaixo da especificação. Após estudo de possíveis variáveis de montagem da bancada e instalação da tocha que poderiam estar afetando o diâmetro de giro decidiu-se entrar em contato com o suporte técnico da Weld Revolution, desenvolvedora da tocha.



Figura 20: “Teach tip”: Bico de contato com arame de 25 mm fixado a sua ponta. Pintado de branco para auxiliar na medição

Após relatar o problema encontrado a empresa prontamente comunicou que houvera outrora caso semelhante e que enviaria o quanto antes um mancal flexível para reposição. Possivelmente uma falha na usinagem do mancal estava causando a diferença no diâmetro de giro efetivo.

A aquisição das imagens foi realizada com uma câmera de vídeos fixada perpendicularmente ao bocal da tocha de soldagem. Os vídeos foram importados e analisados como mostra a figura 21.

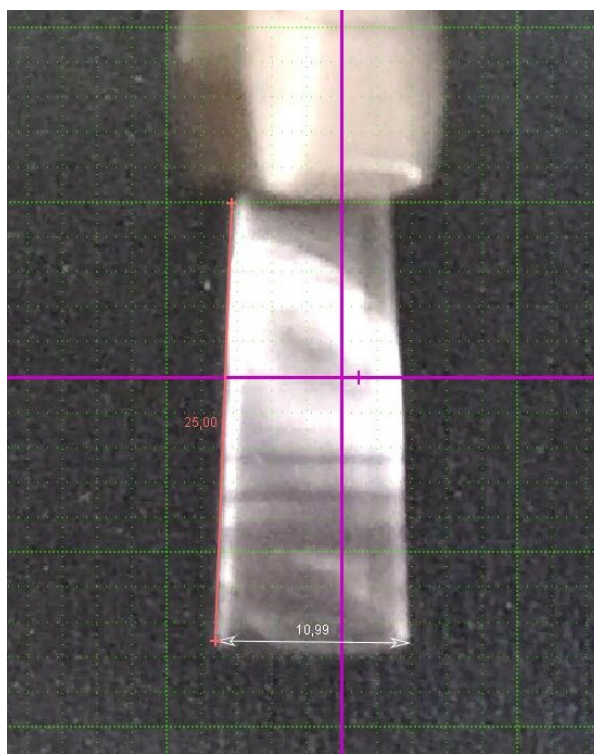


Figura 21: Medição de diâmetro efetivo de giro. A medição é feita na ponta do arame. 3000 rpm. Posição 8. Diâmetro medido: 10,99mm

Após a chegada da peça de reposição (Crank 2), novas medições foram realizadas. Uma comparação entre os resultados experimentais e a especificação fornecida no manual do usuário (Weld Revolution, 2015) foi realizada como mostra o gráfico 1.

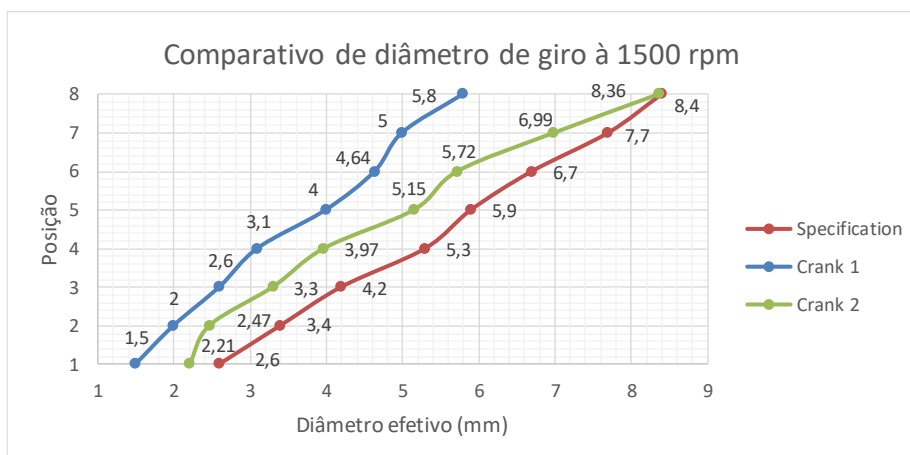


Gráfico 1: Comparação do diâmetro efetivo antes e depois da reposição do mancal flexível e da especificação.

Os gráficos 2 e 3 fazem a comparação entre o diâmetro efetivo de giro antes da troca do mancal (série “crank 1”) e depois da troca do mancal (série “crank 2”).

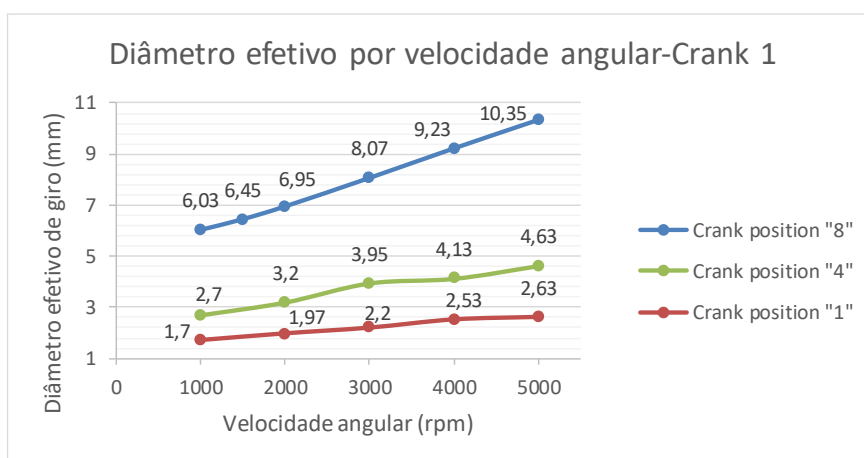


Gráfico 2: Diâmetro efetivo em 3 posições para 5 velocidades angulares diferentes.

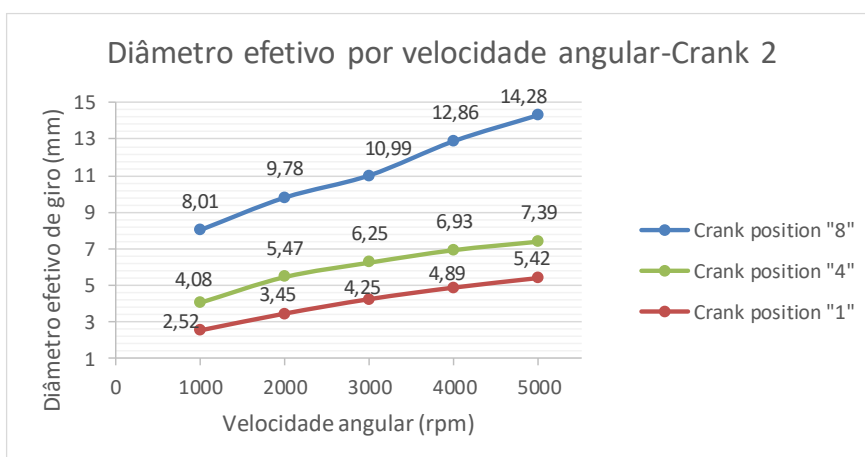


Gráfico 3: Diâmetro efetivo em 3 posições para 5 velocidades angulares diferentes. Após troca do mancal flexível.

5.3 Medição de velocidade de transferência metálica

Para medir o módulo da velocidade da gota fundida em direção a poça de fusão foi utilizado novamente o software Tracker. A figura 22 mostra a interface do programa no qual se posiciona o centro de massa de uma gota definida a cada frame desde o destacamento do arame até a deposição na poça fundida. Calibra-se uma escala dimensional com base no diâmetro do arame (1,2 mm). A distância percorrida pela gota é medida, assim como o tempo gasto para percorrer a mesma. Com tais dados é possível definirmos a velocidade média neste período. Pequenos deslocamentos da gota no eixo x foram desconsideradas no cálculo da velocidade pois o erro foi considerado aceitável para comparação com a velocidade tangencial. Pode-se ver no canto esquerdo inferior da figura 22 os pontos medidos: deslocamento no eixo x, deslocamento no eixo y e tempo (t).

Como podemos ver na figura 23 uma linearização da trajetória percorrida pela gota resulta numa equação linear do tipo $y = Ax + B$, na qual A indica a taxa de variação de deslocamento no tempo, em outras palavras a velocidade da gota. Para essa gota encontrou-se uma velocidade de 1,52 m/s.

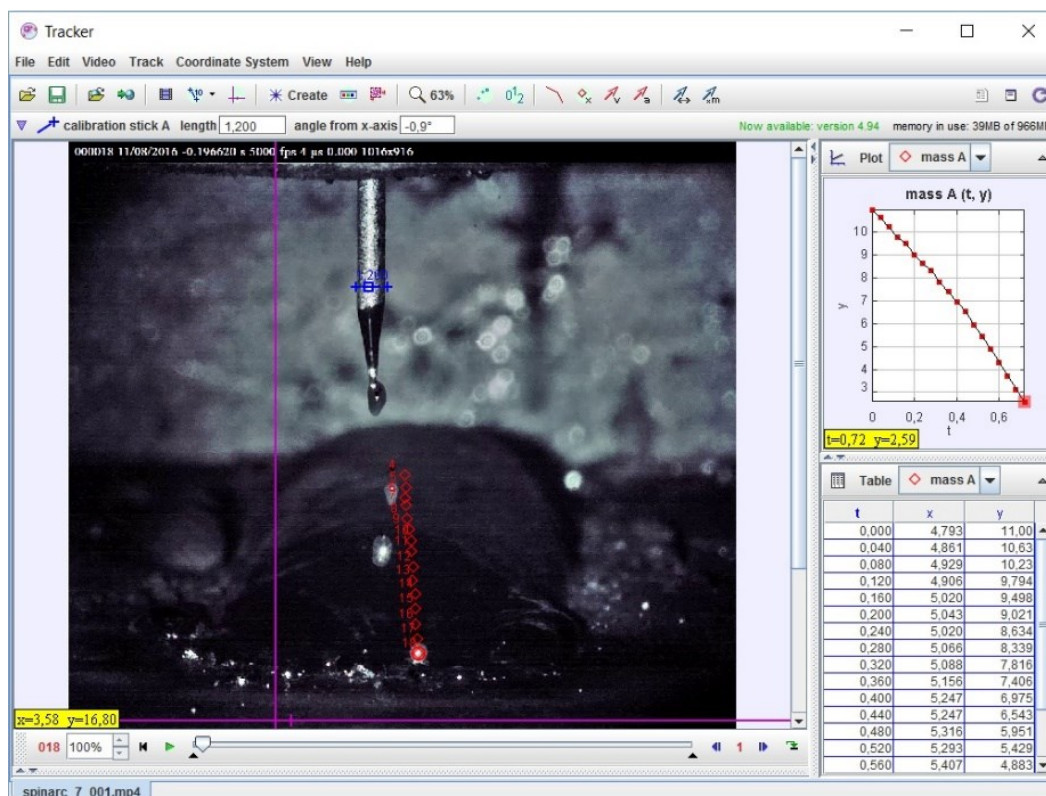


Figura 22: Interface da análise gráfica de transferência metálica.

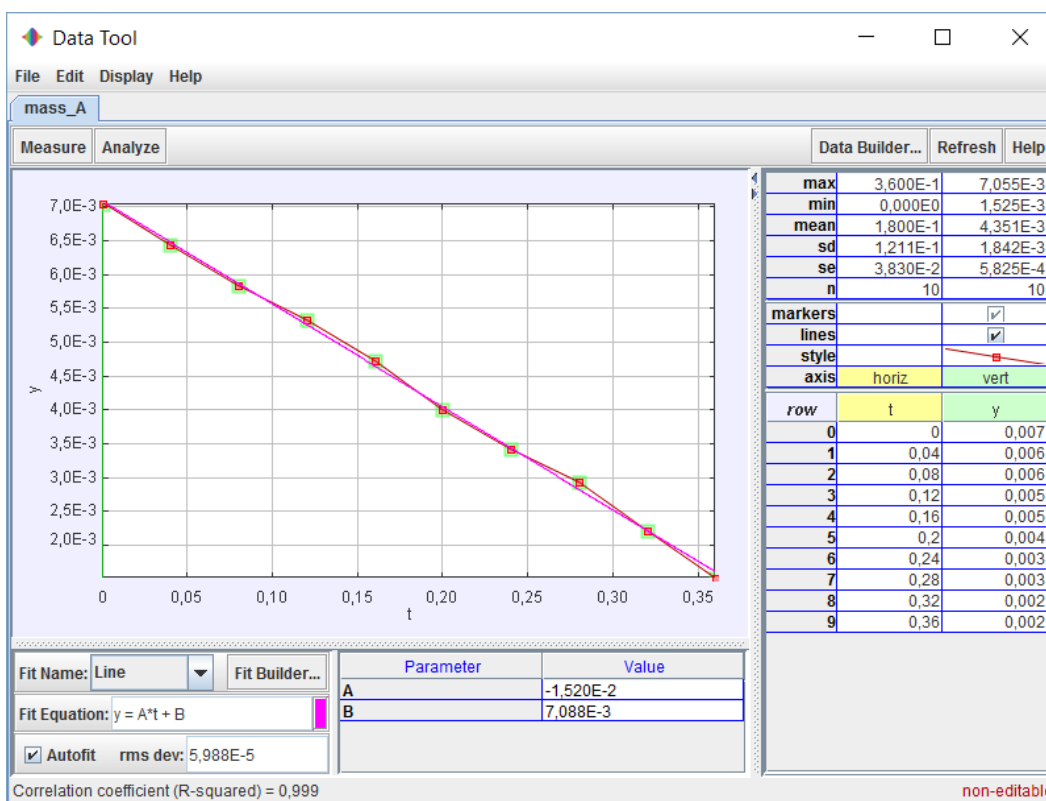


Figura 23: Ferramenta de análise estatística e modelagem matemática.

5.4 Medição da velocidade tangencial

Visando estudar a influência da rotação do arame-eletrodo na transferência metálica foi calculado a velocidade tangencial na extremidade final do arame para se comparar com a velocidade da gota em direção a poça de fusão. Os Gráficos 4 e 5 mostram os valores encontrados. É conhecido a direção e sentido do movimento tanto do arame quanto da gota em direção a poça de fusão, portanto, após calcular o módulo da velocidade é possível determinar a influência da rotação sobre o percurso da gota ao analisar o vetor resultante como esquematiza a figura 24.

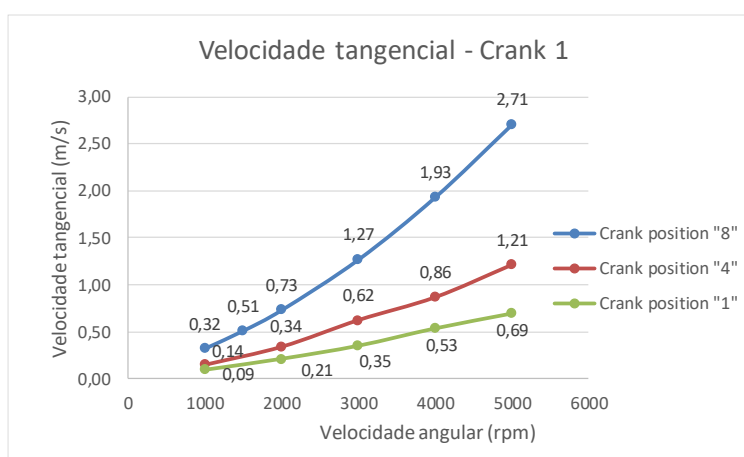


Gráfico 4: Velocidade tangencial média na ponta do arame em três posições para 5 velocidades de rotação.

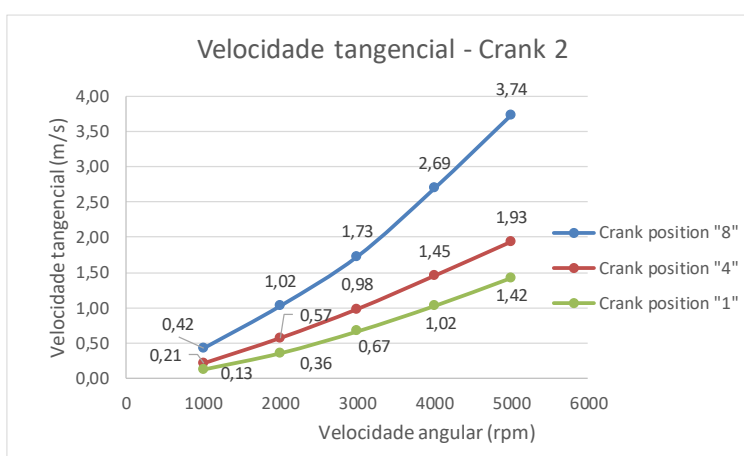


Gráfico 5: Velocidade tangencial média na ponta do arame em três posições para 5 velocidades de rotação. Após mudança do mancal flexível.

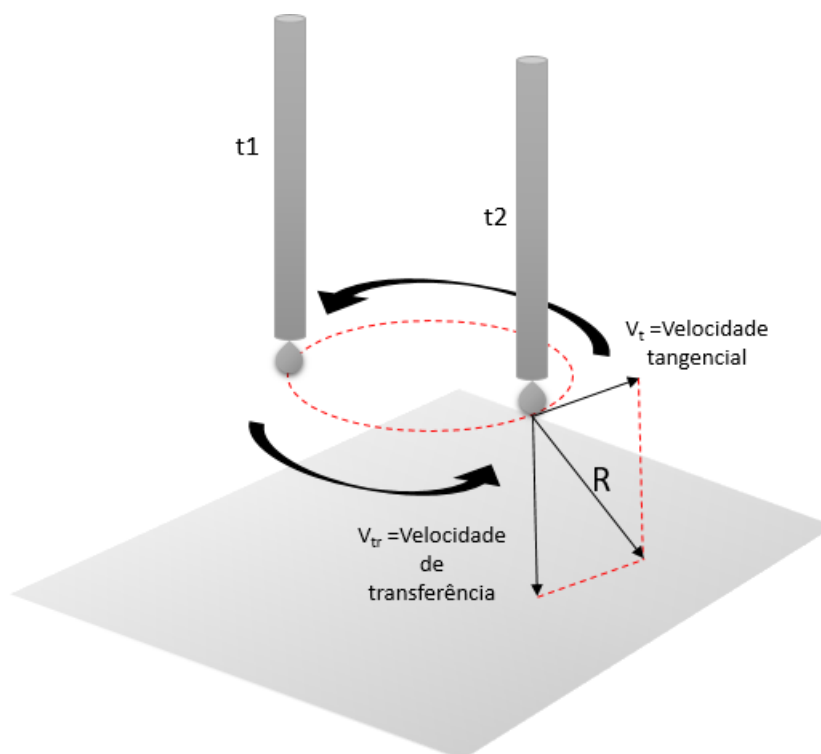


Figura 24: Vetor resultante da velocidade: $\vec{R}$

5.5 Desenvolvimento de parâmetro de soldagem para revestimento de chapa metálica na posição plana com material de adição Inconel 625 (AWS ERNiCrMo-3)

Um procedimento de soldagem para revestimento em chapa plana foi cedido pela empresa desenvolvedora da tocha MA-400 (Anexo II). O terceiro objetivo visou reproduzir esse procedimento.

Algumas dificuldades foram encontradas na realização do procedimento. Primeiramente a indisponibilidade de utilizar uma fonte de soldagem igual não permitiu o uso dos mesmos parâmetros elétricos. No procedimento foi utilizado uma fonte de soldagem Miller. Infelizmente há uma tendência em proteger o *know-how* da empresa com a utilização de programas pré-determinados de soldagem que não evidenciam os reais parâmetros elétricos atuantes.

Sem conhecer os parâmetros elétricos do programa sinérgico utilizado na fonte Miller, foi utilizado um programa já presente na fonte IMC Digiplus A7 com a qual o esse trabalho foi desenvolvido.

A inclusão da rotação durante a soldagem de revestimento dificultou a parametrização principalmente pela irregularidade na deposição de material. A presença de respingos fora do cordão de solda causa desvios na geometria e consequentemente pontos de possíveis defeitos na deposição dos passes subsequentes. A figura 25 mostra um dos cordões obtidos na tentativa de diminuir a quantidade de respingos fora da poça de fusão e ao mesmo tempo obter-se uma baixa penetração.



Figura 25: Cordão de solda realizado com a tocha MA-400. $V_t = 1200$ rpm

6. Resultados

6.1 Medição de velocidade de rotação

Com a medição da velocidade de rotação pudemos comprovar que no quesito de reprodutibilidade a tocha MA-400 apresenta um desempenho satisfatório. Entretanto, o fato da rotação do eletrodo em velocidades inferiores a 1000 rpm não ser possível é uma desvantagem do equipamento.

6.2 Medição de diâmetro efetivo de giro

A variação do diâmetro de giro efetivo demonstrou ser um ponto sensível do processo, diminuindo a confiabilidade do equipamento.

Os resultados das medições indicam que é possível obter diâmetros de giro de até aproximadamente 14,3 mm o que pode ser útil para aplicação em preenchimento de juntas com *Gaps* maiores.

Conforme os dados experimentais percebe-se que há um crescimento linear no diâmetro de giro em função do aumento da velocidade. As funções lineares 1, 2 e 3 são modelos simplificados do fenômeno. Sendo cada uma respectivamente para as posições 8, 4 e 1.

$$\phi_8 = 0,0016V_t + 6,5 \quad (1)$$

$$\phi_4 = 0,0008V_t + 3,6 \quad (2)$$

$$\phi_1 = 0,0007V_t + 1,9 \quad (3)$$

6.3 Comparação entre velocidade de transferência e velocidade tangencial da gota

Conforme os resultados experimentais tanto de velocidade tangencial da gota como velocidade de transferência da gota podemos concluir o seguinte:

A velocidade de transferência da gota com os parâmetros utilizados nesse trabalho foi da ordem de 1,5 m/s. A faixa de velocidade tangencial imposta pela rotação foi de 0,13 m/s até 3,74 m/s, como mostra o gráfico 5. Portanto, conclui-se que a rotação interfere significativamente na direção de transferência da gota como pode ser observado nos testes de soldagem. Essa interferência, entretanto, pode ser pequena, como nos casos onde se utiliza baixa rotação ou pequenos diâmetros de giro. A figura 26 ilustra bem o fenômeno.



Figura 26: Cordão de solda com deposição extremamente irregular devido a rotação do eletrodo. Arame ER-70S-6 sobre chapa de aço 1020. $V_t = 2500$ rpm.

A interferência da força centrípeta, medida pela velocidade tangencial, porém, é benéfica em determinadas aplicações como por exemplo o preenchimento de juntas nos quais se deseja uma penetração das paredes laterais do *gap*. Sendo assim o processo permite variadas aplicações embora sua parametrização seja mais complexa do que outros processos que aparentemente podem apresentar resultados equivalentes.

6.4 Desenvolvimento de parâmetro de soldagem para revestimento de chapa metálica na posição plana com material de adição Inconel 625 (AWS ERNiCrMo-3)

Os resultados obtidos foram considerados não satisfatório pois para alcançar uma frequência de destacamento de gota com pequeno diâmetro foi necessário utilizar uma energia de soldagem muito elevada. Consequentemente foi evidente que uma baixa diluição seria inviável. A figura 27 mostra o cordão em que se obteve os melhores resultados, entretanto longe ainda do esperado de acordo com os resultados obtidos pela empresa desenvolvedora.

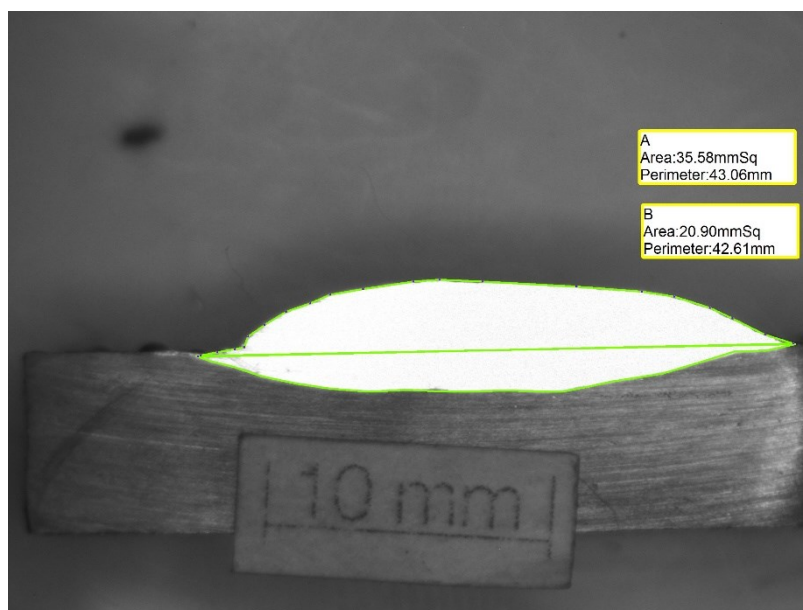


Figura 27: Macrografia evidenciando a zona fundida.

Diluição: 37%

A deposição de Inconel 625 mostrou-se muito mais estável em comparação ao aço ER70S-6. O motivo da diferença não foi estudado nesse trabalho, porém acredita-se que a diferença de tensão superficial atuante na gota entre os dois materiais seja o motivo. Esse tópico deve ser melhor estudado em um trabalho futuro.

7. Conclusão

Primeiramente, ao olhar para trás e fazer uma visão geral do estágio realizado fica evidente a evolução do estagiário tanto no âmbito teórico da soldagem como também no aprendizado técnico laboratorial de um instituto ligado ao ramo da soldagem. Com certeza as próximas experiências profissionais e acadêmicas do aluno serão influenciadas positivamente pelo conteúdo teórico e prático desenvolvido neste estágio.

Os resultados encontrados foram insatisfatórios no quesito de qualidade de soldagem, porém serão com certeza muito úteis para os próximos pesquisadores que continuarem a desenvolver o conhecimento sobre a tocha de soldagem MA-400 Spin Arc.

A pesquisa sobre preenchimento de juntas na união de tubos para a indústria de óleo e gás não foi possível devido aos inúmeros problemas que ocorreram durante o estágio, os quais atrasaram o cronograma inicialmente proposto. O defeito de fabricação na peça principal da tocha bem como a lentidão e burocracia do processo de compra de consumíveis imposta pelo sistema financiador também impactaram diretamente no andamento do trabalho. Contudo, o objetivo de um estágio como esse é verdadeiramente apresentar tais problemáticas ao aluno, pois elas estarão sempre presentes independente onde os próximos trabalhos forem realizados.

O processo MIG/MAG com a utilização da tocha MA-400 Spin Arc na percepção do estagiário é vendido de uma forma exagerada pelo desenvolvedor. Entretanto a sua capacidade deve ser estudada mais precisamente de forma mais particular. Alguns trabalhos futuros podem ser listados:

1. **Sucesso na execução do procedimento de soldagem para revestimento com Inconel 625 com a parametrização ótima de frequência de destacamento da gota, velocidade de soldagem e parâmetro de tecimento.**
2. **Execução do procedimento de soldagem indicado para preenchimento de junta para união de tubos.**
3. **Análise da influência da rotação na metalurgia da solda.**

Acredita-se que a aplicação em processos que exijam grandes taxas de deposição e produção devem ser levados como o objetivo principal do equipamento e por outro lado deve-se ter um olhar mais crítico sobre a utilização da tocha MA-400 quando deseja-se um processo no qual busca-se sobretudo a regularidade de deposição.

8. Anexos

8.1 Anexo I – Histórico da empresa

“A criação do que atualmente é denominado LABSOLDA surgiu em consequência do contato estabelecido pelo Professor Caspar Erick Stemmer com o Professor Dr. Ing. Paul Drews da Universidade de Aachen. Este contato foi estabelecido por ocasião de sua viagem à Alemanha no final de 1972 visando estabelecer a possibilidade de um apoio internacional ao Departamento de Engenharia Mecânica. Segundo o Prof. Drews existiria a possibilidade de se obter um apoio do “Internationales Büro”, órgão do antigo KFA (Kernforschungsanlage) e hoje denominado Forschungszentrum Jülich (Centro de Pesquisas de Jülich). O Prof. Drews intermediou a conexão do Prof. Stemmer com aquele órgão do KFA. Como resultado inicial desta conexão, o Prof. Stemmer foi apresentado ao Eng. Egon Sigismund, técnico de soldagem no KFA, exemplar profissional que atuou tecnicamente e com incansável dedicação na transmissão dos primeiros treinamentos nos equipamentos que vieram como doação do governo alemão por intermédio do citado Internationales Büro. Sem dúvida alguma o Sr. Sigismund foi pessoa chave para o que hoje é o LABSOLDA.

Os equipamentos recebidos como doação do Governo Alemão por intermédio do “Internationales Büro”, foram ; uma máquina para o processo TIG e Eletrodo revestido da empresa Oerlikon (França), uma máquina para o Processo MIG/MAG da empresa Cloos (Alemanha), uma máquina de solda ponto da empresa ARO (França), uma pequena máquina para brasagem à chama com hidrogênio da empresa Alexander Binzel (Alemanha), uma pequena mesa giratória para soldagem de tubos, e artefatos diversos para chama oxi-acetilênica (equipamentos de última geração). Estes equipamentos chegaram no final de 1973.

Na época o LABSOLDA possuía dois equipamentos adquiridos no mercado nacional, sendo uma máquina de solda elétrica para soldagem com eletrodo revestido e um equipamento de solda oxi-acetileno. Era ministrada a disciplina de Tecnologia Metalúrgica com um pequeno conteúdo relacionado à soldagem, pelo prof. Almir Monteiro Quites.

A contratação do Eng. Jair Carlos Dutra em março de 1974, juntamente com a vinda dos equipamentos modernos, da Alemanha, acima citados, juntamente com o prof. Quites e a participação do Eng. Sigismund, através de viagens frequentes ao Brasil, criaram um laboratório importante na formação dos alunos, futuros engenheiros mecânicos, mas também de apoio ao setor industrial na solução de seus problemas na área da soldagem.

As dificuldades foram muitas para manter em adequado funcionamento os equipamentos vindos da Alemanha, pois a estrutura da universidade não estava preparada para dar suporte às necessidades do laboratório. O Eng. Sigismund também prestava assistência na aquisição de amostras, peças de reposição e material de consumo, suprindo assim as necessidades do laboratório.

9. Cronograma de atividades

	Cronograma de atividades - Estágio curricular 5															
	Pedro Correa Jaeger Rocha															
	Maio		Junho				Julho				Agosto				Setembro	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Atividades desenvolvidas																
Montar bancada de trabalho																
Testes preliminares																
Filmagem de alta velocidade																
Medição velocidade angular																
Medição diâmetro efetivo																
Medição velocidade de transferência																
Parametrização para revestimento																

10. Bibliografia

Brown Douglas [Online] // Tracker: Video analysis and modeling tool. - 25 de 07 de 2016. - <http://physlets.org/tracker/>.

Carvalho R.S. Tecnologias para execução de revestimentos via soldagem automática das paredes d'água de usinas termelétricas. - Florianópolis : UFSC, 2015.

Connor L.P e O'Brien R.L. Welding Handbook: Welding Processes [Livro]. - Miami : Armer Welding Society, 1991.

Hebei Meide Steel Pipe Hebei Meide Steel Pipe [Online]. - 2016. - 21 de 08 de 2016. - http://www.meidegg.cn/en/list/?2_1.html.

Lardner T.J. An introduction to the mechanics of solids [Livro]. - [s.l.] : McGraw-Hill College, 1972. - 2.

Silva R.H.G. Inovações em equipamentos e em parametrização no processo de revestimento por plasma-pó (PTA-P) [Relatório]. - Florianópolis : UFSC, 2010.

Taskmaster-inc taskmaster-inc [Online]. - 2016. - 21 de 08 de 2016. - <http://taskmaster-inc.com/ptawelding-and-overlays/>.

Walker J. Fundamentos de física [Livro]. - São Paulo : LTC, 2002. - 9.

Weld Revolution MA-400 Operation Manual [Relatório]. - Spring, Texas : Weld Revolution, 2015.

Weld Revolution Weld revolution [Online]. - 2015. - 21 de 08 de 2016. - <http://www.weldrevolution.com/wp-content/uploads/2015/08/Welding-Productivity-Article-July-August-2015.pdf>.

Weld Revolution youtube weld revolution [Online]. - 2015. - 21 de 08 de 2016. - <https://www.youtube.com/watch?v=2ypRMYEdMXE&feature=youtu.be>.