

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**A INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO DA SOLDAGEM
MIG/MAG NA PROFUNDIDADE E DILUIÇÃO DO AÇO
SAE 1045**

Everton Alves Cabral de Lara

Fábio de Oliveira José

**Pindamonhangaba - SP
2024**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**A INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO DA SOLDAGEM
MIG/MAG NA PROFUNDIDADE E DILUIÇÃO DO AÇO
SAE 1045**

Everton Alves Cabral de Lara

Fábio de Oliveira José

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Dr. Edilon de Oliveira França

**Pindamonhangaba - SP
2024**

L318i

Lara, Everton Alves Cabral de.

A influência do aporte térmico da soldagem MIG/MAG na profundidade e diluição do aço SAE 1045 / Everton Alves Cabral de Lara; Fábio de Oliveira José / FATEC Pindamonhangaba, 2024.

40f.: il.

Orientador Professor Dr. Edilon de Oliveira França
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2024

1. Metalurgia. 2. Soldagem. 3. Aporte térmico. 4. Aço SAE 1045. 5. MIG/MAG. I. Lara, Everton Alves Cabral de. II. José, Fábio de Oliveira. III. França, Edilon de Oliveira. IV. Título.

CDD 621

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“A INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO DA
SOLDAGEM MIG/MAG NA PROFUNDIDADE E
DILUIÇÃO DO AÇO SAE 1045”.**

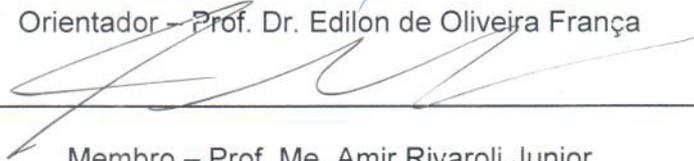
**Everton Alves Cabral de Lara
Fábio de Oliveira José**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica: Processos de
Soldagem.

Comissão Examinadora



Orientador – Prof. Dr. Edilon de Oliveira França



Membro – Prof. Me. Amir Rivaroli Junior



Membro – Tecnólogo Rener Washington Mariano dos Santos

Pindamonhangaba, 28 de junho de 2024.

DEDICATÓRIA

Everton Alves Cabral de Lara

À Deus por me proporcionar saúde e perseverança ao longo dos anos do curso. A minha mãe Janaina Alves Cabral, pela educação e apoio incondicional ao longo de todos esses anos. Sua confiança em mim foi essencial para que eu pudesse alcançar este objetivo.

DEDICATÓRIA

Fábio de Oliveira José

À Deus por me proporcionar saúde e perseverança ao longo dos anos do curso. Aos meus pais Simão José Sobrinho e Maria Diomar Oliveira pelo incentivo e cobrança. À minha esposa Aline Glaucia Henrique de Oliveira por apoiar e compreender o tempo que muitas vezes fiquei ausente da família. E a Paulo Rogério Barleto de Souza, meu coordenador na empresa Elfer, por proporcionar mudança no turno de trabalho para que fosse possível realizar o curso.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus pela saúde, força e sabedoria para enfrentar todos os desafios durante a realização deste trabalho.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Edilon de Oliveira França, por sua paciência, orientação e valiosas sugestões. Sua dedicação e compromisso com a excelência foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Agradecemos também a todos os professores do curso de Processos de soldagem da FATEC - Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba- SP, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos nossos amigos e colegas, pelas inúmeras horas de estudo compartilhadas, discussões acadêmicas e momentos de descontração que tornaram esta jornada mais leve.

Finalmente, somos gratos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja através de sugestões valiosas ou simplesmente estando ao meu lado.

Obrigado a todos!

LARA, E. A. C.; JOSÉ, F. O. **A influência do aporte térmico da soldagem MIG/MAG na profundidade e diluição do aço SAE 1045.** 2024. 42p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

RESUMO

A soldagem apresenta uma importância muito grande na metalurgia. A forma como são desenvolvidos os parâmetros do processo, o material a ser utilizado e a própria aplicação, tem um papel fundamental na qualidade final do produto. Nesse contexto, o aço é o material mais instável das ligas metálicas, sendo necessário a escolha correta das suas mais variadas ligas e o processo de soldagem mais adequado. Este trabalho teve o objetivo de estudar a influência do aporte térmico na profundidade de penetração e na diluição do aço SAE1045, utilizou-se o processo de soldagem MIG/MAG, método empurrando com angulo de 20° e stick out de 10mm. Para realizar essa variação foram utilizados duas chapas de aço 1045 de iguais dimensões identificadas como CP1 e CP2. As diferenças de aporte térmico de cada condição foram CP1 1,17kJ/mm e CP2 1,06KJ/mm. Na sequência, as chapas foram cortadas, e retirado uma amostra medindo 10mm de largura cada, com a finalidade de realizar o ensaio de macrografia e micrografia da solda. Quanto a penetração, foi possível observar uma pequena diferença entre as amostras. Entretanto, na diluição, houve uma diferença de 5%, CP1 48% e o CP2 43%, ficando as duas dentro dos valores que, para aços de baixo teor de carbono é de 50% de diluição. Quanto ao aporte térmico, a diferença foi de 10%. As microestruturas das duas condições de solda estudadas apresentaram-se iguais, tanto na zona fundida como na ZTA (Zona Térmica Afetada). Conclui-se que a diferença do aporte térmico não foi suficiente para modificar as estruturas e a medida de penetração, mas influenciou o aumento da diluição.

Palavras-chave: Metalurgia. Soldagem. Aporte térmico. Aço SAE1045. MIG/MAG.

LARA, E. A. C.; JOSÉ, F. O. **A influência do aporte térmico da soldagem MIG/MAG na profundidade e diluição do aço SAE 1045.** 2024. 41p. Trabalho de Graduação (Curso de Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

ABSTRACT

Welding is very important in metallurgy. The way in which the process parameters, the material to be used and the application itself are developed, plays a fundamental role in the final quality of the product. In this context, steel is the most unstable material among metallic alloys, requiring the correct choice of its most varied alloys and the most appropriate welding process. This work aimed to study the influence of heat input on the penetration depth and dilution of SAE1045 steel, using the MIG/MAG welding process, pushing method with an angle of 20° and stick out of 10mm. To carry out this variation, two 1045 steel sheets of equal dimensions identified as CP1 and CP2 were used. The differences in thermal input for each condition were CP1 1.17kJ/mm and CP2 1.06KJ/mm. Next, the sheets were cut, and samples measuring 10mm wide each were taken, with the purpose of carrying out the macrographic and micrographic tests of the weld. As for penetration, it was possible to observe a small difference between the samples. However, in dilution, there was a difference of 5%, CP1 48% and CP2 43%, both remaining within the values that, for low carbon steels, are 50% dilution. As for thermal input, the difference was 10%. The microstructures of the two welding conditions studied were the same, both in the molten zone and in the HAZ (Thermal Affected Zone). It is concluded that the difference in thermal input was not enough to modify the structure and penetration measurement, but it influenced the increase in dilution.

Keywords: Metallurgy. Welding. Thermal input. SAE1045 steel. MIG/MAG

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Rendimento Térmico em Função do Processo de Soldagem.....	24
Tabela 2	Aporte Térmico dos Processos de Soldagem e Suas Aplicações	25
Tabela 3	Composição aço Peso em Porcentagem [%].....	26
Tabela 4	Parâmetros de Soldagem	27
Tabela 5	cálculo da Diluição do CP1 e CP2	31
Tabela 6	Cálculo do Aporte térmico.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Microestrutura aço 1045.....	15
Figura 2 Cut Off para cortes mecanográficos	16
Figura 3 Catalizador e Resina Poliéster Embutimento a Frio	17
Figura 4 Embutimento A) prensa a quente, B) Balde de Baquelie e esprey de desmoldante e C) Amostra embutida	18
Figura 5 Processo de Soldagem.....	19
Figura 6 Equipamento Básico para Desenvolvimento do Processo MIG/MAG	20
Figura 7 Peça Fabricadas com Aço 1045.....	21
Figura 8 Diluição em uma camada depositada por técnica de soldagem	23
Figura 9 Máquina soldagem automática MIG	26
Figura 10 Cortadeira Mecanográfica Marca Teclago modelo CM80.....	28
Figura 11 Lixadeira automática Marca Arotec modelo Aropol	28
Figura 12 Estereoscópio Marca Olympus modelo SZ.....	29
Figura 13 Microscópio Marca Olympus modelo CX31.....	30
Figura 14 Medida Penetração solda CP1 e CP2	31
Figura 15 Região da solda : A) CP1 B) CP2.....	33
Figura 16 Microestrutura ZTA : A) CP1 , B) CP2.....	34
Figura 17 Estrutura do Metal base.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
INVESTIGAR A INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO DA SOLDAGEM MIG/MAG NA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO E NA DILUIÇÃO DO AÇO SAE 1045.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. METALOGRAFIA	15
2.2 AÇO SAE 1045	21
2.4 APORTE TÉRMICO	24
3 METODOLOGIA	26
3.1 ESTUDO DA MICROESTRUTURA E MACROESTRUTURA	27
3.1.1 MACROGRAFIA DA SOLDA	27
3.1.2 MICROGRAFIA DA SOLDA	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 ESTUDO DA PENETRAÇÃO, DILUIÇÃO E APORTE TÉRMICO DA SOLDA	31
MICROGRAFIA DA SOLDA.....	33
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O material mais instável das ligas metálicas é o aço. Produzido de diversas formas e variedades diversas, para ser eficaz a uma ou mais aplicações. Esta variedade decorre da necessidade, adequações dos produtos às exigências do mercado que necessita de aplicações específicas, mudanças das propriedades mecânicas, composição química, ou até mesmo na forma final do material (GANDELMAN, 2017).

Embora a soldagem remonte à antiguidade, sua verdadeira evolução começou no início do século XIX, com a descoberta do arco elétrico por Sir Humphry Davy em 1801, que foi oficialmente apresentada em 1808 para a Royal Society em Londres. (MIGUEL; COELHO, 2022).

A soldagem desempenha um papel muito importante na metalurgia, permitindo a união eficiente e econômica de materiais metálicos. Entre as diversas técnicas de soldagem, destaca-se o processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) pela sua versatilidade e permitem a operação com vários modos de transferência metálica, como globular, spray e curto-circuito, destaca-se por alta produtividade, a possibilidade de robotização e muito utilizado em várias indústrias (MIGUEL; COELHO, 2022).

O processo GMAW, também conhecido como MIG/MAG, teve seus primeiros trabalhos realizados com gás ativo em peças de aço no início dos anos 30. A partir de 1951, passou a ser utilizado na soldagem de aço carbono e é hoje um dos processos mais amplamente empregados em diversas indústrias. (SOARES; PEREIRA, 2022).

No contexto da soldagem do aço SAE 1045, é fundamental compreender a influência do aporte térmico na profundidade e diluição das juntas soldadas para garantir a qualidade e integridade das estruturas produzidas. O aporte térmico, que se refere à quantidade de calor fornecida durante o processo de soldagem, desempenha um papel crucial na formação da zona fundida e na região termicamente afetada do material base. No entanto, os efeitos específicos do aporte térmico na profundidade de penetração da solda e na diluição das ligas metálicas ainda necessitam de uma compreensão mais aprofundada, especialmente no caso do aço SAE 1045 (SOARES; PEREIRA, 2022).

1.1 PROBLEMA

Como o aporte térmico da soldagem MIG/MAG influencia a profundidade de penetração e a diluição do aço SAE 1045?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar a influência do aporte térmico da soldagem MIG/MAG na profundidade de penetração e na diluição do aço SAE 1045.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão bibliográfica abrangente sobre os princípios da soldagem MIG/MAG, as propriedades do aço SAE 1045 e os efeitos do aporte térmico na soldabilidade de materiais metálicos.
- Soldar o aço SAE 1045 em processo MIG/MAG.
- Realizar Macrografia.
- Medir a profundidade da penetração de solda.
- Medir diluição
- Realizar Micrografia.

1.3 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema decorreu da relevância deste assunto no contexto da indústria metalúrgica. A soldagem é um processo essencial na fabricação de estruturas metálicas, e a soldagem MIG/MAG destaca-se como uma das técnicas mais utilizadas devido à sua versatilidade e eficiência. No entanto, apesar da sua ampla aplicação, há uma lacuna significativa no entendimento dos efeitos do aporte térmico nesse processo, especialmente quando se trata da soldagem do aço SAE 1045 (SOARES; PEREIRA, 2022).

O aço SAE 1045 é frequentemente empregado em uma variedade de aplicações industriais devido às suas propriedades mecânicas e resistência, tornando crucial o desenvolvimento de técnicas de soldagem que garantam a integridade estrutural e a durabilidade dos componentes produzidos (MIGUEL; COELHO, 2022).

A abordagem proposta nesta pesquisa possui diversos pontos positivos. Primeiramente, a investigação sistemática dos efeitos do aporte térmico na profundidade de penetração e na diluição da solda contribuirá para fornecer informações valiosas para a otimização dos processos de soldagem, possibilitando o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de controle de qualidade.

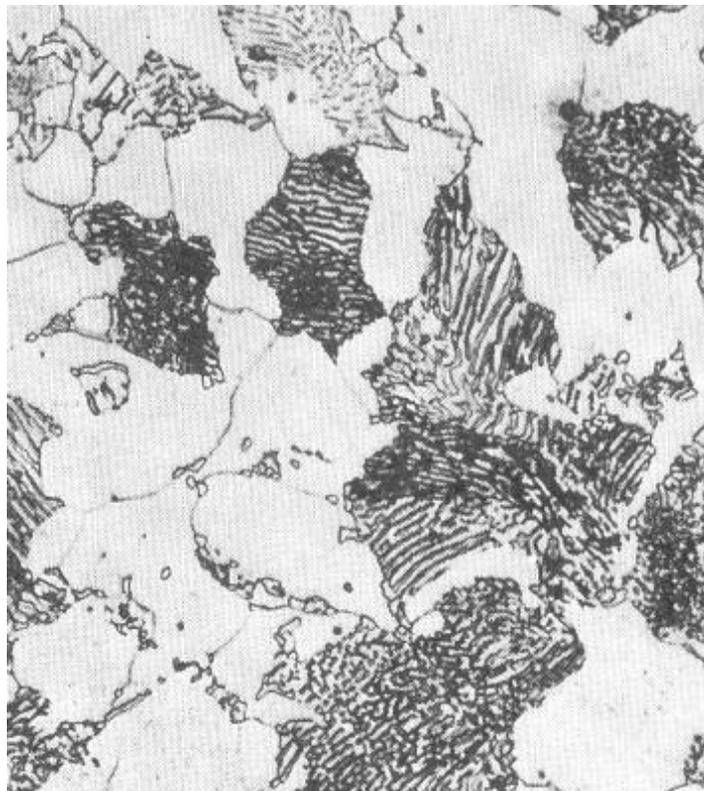
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Metalografia

A metalografia é um ensaio fundamental para a caracterização e estudo da microestrutura dos metais, sendo a técnica mais comumente utilizada para esse fim. Ela permite analisar metais como aços, ferros fundidos e ligas não ferrosas. Significativamente a microestrutura do material, sendo a metalografia a ferramenta essencial para essa análise. Para isso, a superfície da amostra deve ser preparada de forma a refletir a luz adequadamente. O uso de reagentes metalográficos é crucial para revelar a microestrutura, pois esses reagentes promovem a corrosão localizada e seletiva de regiões ou fases específicas. Dependendo do objetivo ou das fases a serem reveladas, existem reagentes metalográficos específicos para cada finalidade. (BEPPLER, 2016).

Microestrutura do aço 1045 ilustrada na Figura 1 (BEPPLER, 2016).

Figura 1 Microestrutura aço 1045



Fonte: Machado (20224)

Para realizar a metalografia deve-se seguir algumas etapas fundamentais desse processo que incluem corte, para realizar o corte previamente tem que verificar a região a ser estudada e realizar o corte destacando a região de interesse a ser analisada, é utilizada uma cortadeira tipo Cut Off refrigerada para durante o corte não ocorrer mudança devido a aquecimento. Na Figura 2 é ilustrada uma Cut Off.

Figura 2 *Cut Off* para cortes mecanográficos



Fonte: Magni (2024)

Após realizar a etapa de corte a amostra metálica está em uma dimensão muito pequena que dificulta o lixamento com segurança e eficiência, deste modo faz-se necessário envolver a amostra metálica com um revestimento polimérico chamado de Embutimento, que pode ser a frio ou a Quente. O embutimento pode

ser feito a Frio quando a mistura do catalizador e resina de poliéster a cura se dá na temperatura ambiente ilustrada na Figura 3 Rohde (2024).

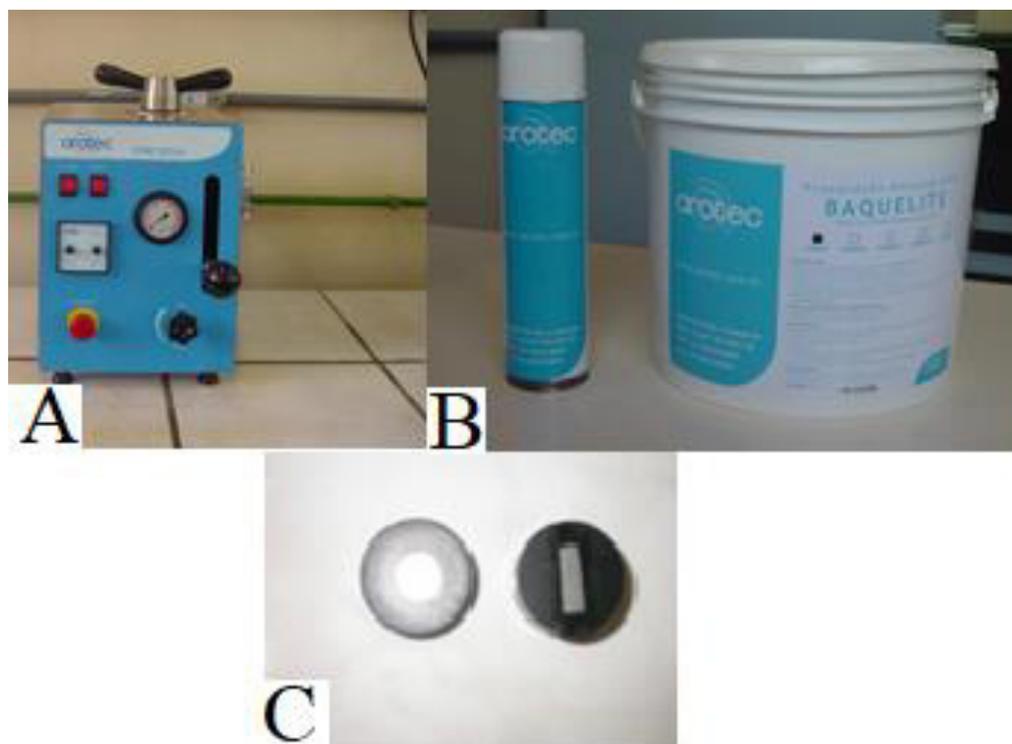
Figura 3 Catalizador e Resina Poliéster Embutimento a Frio



Fonte: QATM (2024)

Já o embutimento a quente é necessária uma prensa a quente onde a granulado de baquelite é inserido e aquecido a uma certa temperatura onde ocorre a fusão da baquelite ocorre com auxílio de uma pressão. Na Figura 4 é Ilustrada a Prensa de embutimento a quente. (ROHDE, 2024)

Figura 4 Embutimento A) prensa a quente, B) Balde de Baquelite e esprey de desmoldante e C) Amostra embutida



Fonte Rohde (2024)

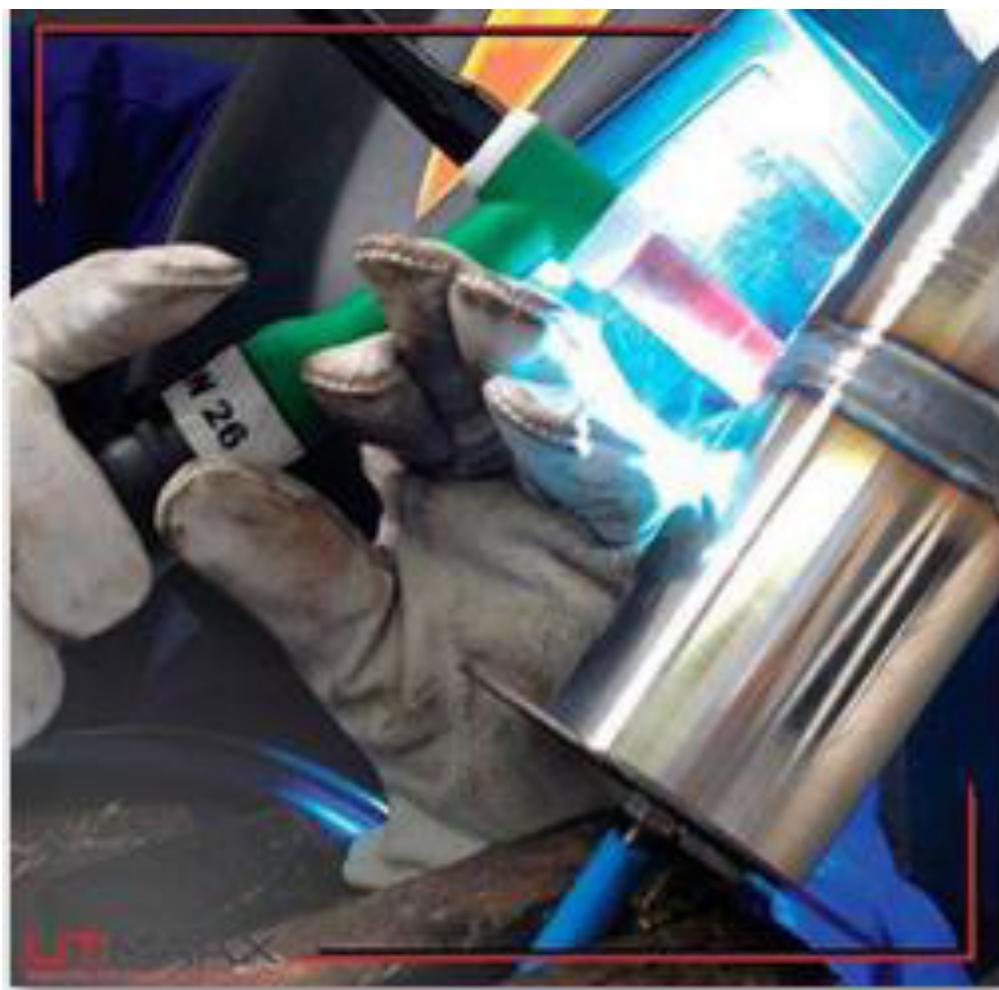
Na sequência ao embutimento é realizado o lixamento, polimento, ataque químico e análise. Por meio dela, é possível identificar estruturas como perlita, cementita, martensita, bainita, ferrita, entre outras. É sabido que a ductilidade das microestruturas ferrítico-perlíticas é comumente avaliada pelo alongamento total observado nos ensaios de tração, o qual tende a ser reduzido pela presença de perlita e elementos de liga em solução sólida (ROHDE, 2024)

2.1.1. Soldagem

A soldagem é um procedimento fundamental para unir materiais metálicos, sendo realizado por meio do aquecimento até atingir uma temperatura e fusão do metal de adição e metal de base. Essa técnica desempenha um papel crucial na fabricação de uma ampla gama de componentes, abrangendo desde dispositivos microeletrônicos até peças estruturais de máquinas pesadas. Com o advento da

automação industrial, observa-se o surgimento da utilização de robôs para soldagem nas linhas de produção, objetivando elevar a produtividade, qualidade e precisão do processo demonstrada na Figura 5 (FARIA; FILLETI; HELLENO, 2022).

Figura 5 Processo de Soldagem



Fonte: UTMXX (2024)

Uma das características preponderantes da soldagem reside na vasta quantidade de parâmetros e variáveis em jogo, acompanhada da complexidade das suas interações. Este cenário torna desafiadora a formulação de modelos matemáticos apropriados para a descrição de processos e/ou a previsão dos resultados de uma operação, o que por sua vez conduz ao surgimento de diversas relações empíricas. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2014).

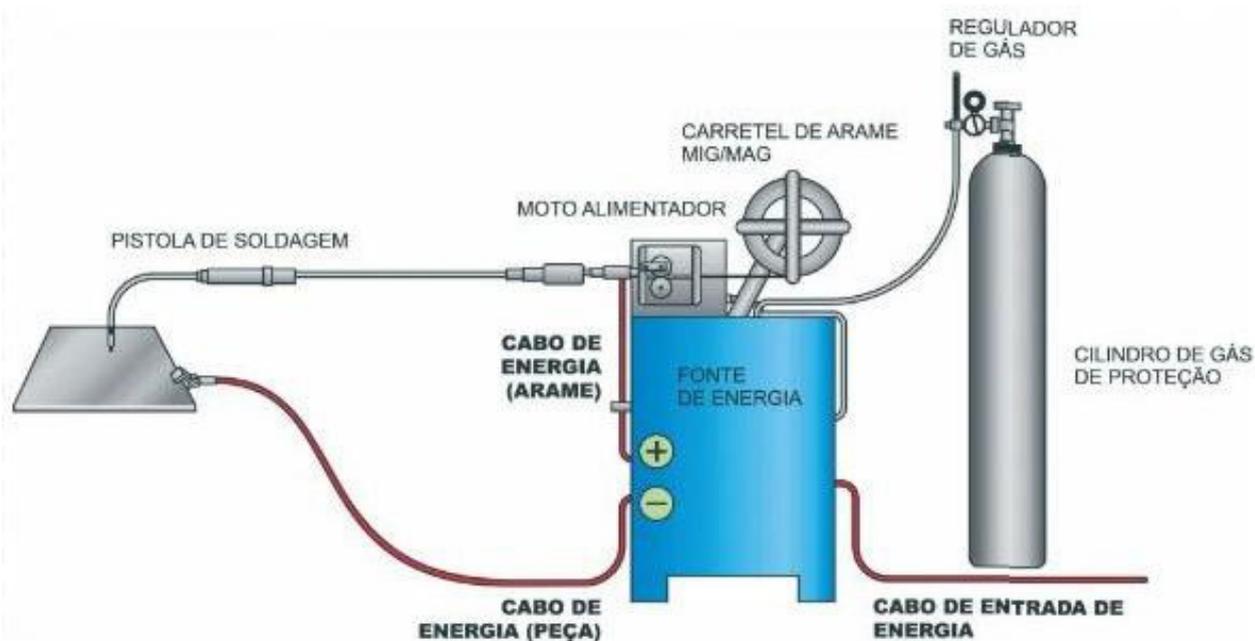
2.1.2. Soldagem MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG é uma técnica amplamente empregada na indústria metalúrgica para unir materiais metálicos de forma eficiente e econômica. O processo é amplamente utilizado devido à sua versatilidade, permitindo a soldagem de uma variedade de materiais e espessuras (MIGUEL; COELHO, 2022).

Este método tem sido empregado ao longo de décadas e suas qualidades notáveis contribuem para tornar o processo MIG/MAG altamente competitivo nos tempos atuais. O processo MIG/MAG foi patenteado em 1930 por Hobart e Devers; no entanto, apenas em 1948 começou a ser adotado comercialmente, quando passou a utilizar gás de proteção inerte. É importante ressaltar que a nomenclatura MIG/MAG é um acrônimo do inglês, representando Metal Inert Gas (MIG) e Metal Active (MAG) (MIGUEL; COELHO, 2022).

Destes processos, a Soldagem por arco elétrico se destaca e são os mais utilizados nas indústrias devido a vantagem de baixo custo de aquisição da fonte de soldagem e de obter alta concentração de calor com altas temperaturas em uma pequena região. Nessa categoria se destacam a soldagem por Eletrodo Revestido e MIG/MAG, na Figura 6 é ilustrado o equipamento básico do processo (RIBEIRO, 2012).

Figura 6 Equipamento Básico para Desenvolvimento do Processo MIG/MAG



Fonte: Cesar (2024)

Essa técnica consiste na formação de um arco elétrico entre a peça e um eletrodo, que é completamente consumível, enquanto a proteção da poça de fusão é garantida por meio de um gás, podendo ser inerte ou ativo. Exemplos de gases inertes incluem argônio e hélio, enquanto o CO₂ é um exemplo de gás ativo. O papel principal desses gases é proteger a poça de fusão dos efeitos nocivos dos gases atmosféricos. (BAUMGAERTNER FILHO, 2017).

2.2 AÇO SAE 1045

Um dos materiais frequentemente soldados usando a técnica MIG/MAG é o aço SAE 1045. Com uma proporção de 0,45% de carbono em sua constituição, o aço SAE 1045 é categorizado como um aço de teor médio de carbono, apresentando excelentes propriedades mecânicas, notadamente uma boa tenacidade e facilidade de usinagem. Suas aplicações abrangem uma ampla gama de usos, incluindo eixos, peças forjadas, engrenagens convencionais, componentes estruturais de máquinas e virabrequins. (COSTA, 2019).

Figura 7 Peça Fabricadas com Aço 1045



Fonte : Brandy (2024), **AÇOS ROMAN (2024)**

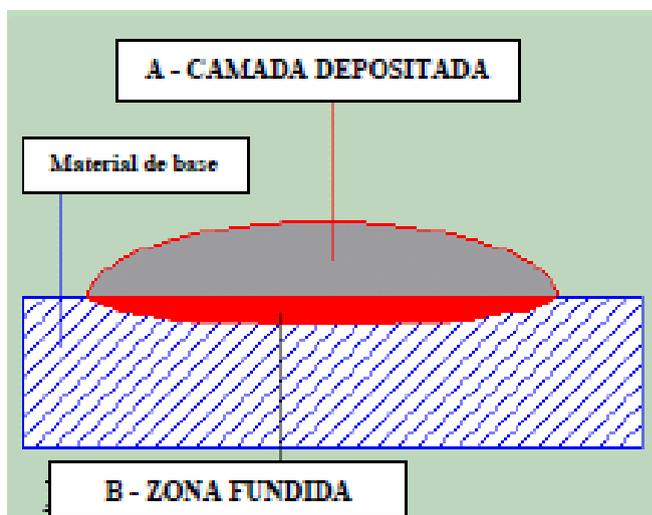
No entanto, durante o processo de soldagem MIG/MAG do aço SAE 1045, questões relacionadas à profundidade de penetração da solda e à diluição das ligas metálicas podem surgir. A profundidade de penetração da solda refere-se à distância que a solda penetra no material base, enquanto a diluição diz respeito à mistura do metal de solda com o material base durante o processo de soldagem, ambos os fatores podem afetar significativamente a qualidade e a integridade da junta soldada (MIGUEL; COELHO, 2022).

2.3 DILUIÇÃO

A diluição é um dos parâmetros fundamentais para alcançar soldagens de revestimento excelentes ao depositar aço inoxidável sobre aços ao carbono. Nesse contexto, é crucial manter um controle rigoroso da diluição, visando minimizá-la durante o processo de soldagem. Esse controle busca reduzir a influência do metal base, garantindo que seu efeito sobre as características do revestimento seja minimizado. (BAUMGAERTNER; GONZALEZ, 2017).

O controle da diluição no processo de revestimento e na soldagem de materiais dissimilares é importante, procura-se nos processos de revestimentos produzir, a mínima diluição possível, suficiente apenas para formar uma perfeita ligação metalúrgica entre metal de adição e substrato, para isso ocorrer tem a necessidade de que haja um controle rígido da diluição, procurando mantê-la no menor nível possível, a Figura 8 demonstra a área A camada depositada e área B zonas fundidas (REIS; RUTTER, 2014).

Figura 8 Diluição em uma camada depositada por técnica de soldagem



Fonte: Souza Neto (2015)

Para realizar o cálculo da diluição pode ser utilizado uma fórmula matemática que está descrita na Equação (1). Para tanto, tem-se B como sendo a área do substrato fundida na solda, e A área do metal adicionada. Sendo assim, $(A+B)$ representa o somatório das duas áreas, ou seja, área total da solda (SOUZA NETO, 2015).

$$d(\%) = \frac{B}{(A+B)} \cdot 100$$

Equação 1

Na soldagem de união ou revestimento, o produto final não se resume apenas ao cordão de solda convencional. Do ponto de vista da metalurgia da soldagem, há três zonas de interesse distintas presentes nas soldas: Metal Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF). Estas áreas podem ser identificadas em uma macrografia. A composição química da zona fundida resultante é influenciada pela diluição, que corresponde à participação relativa do metal de base na formação desta zona. O percentual de diluição pode ser estimado por meio de macrografias da seção transversal da junta soldada. A diluição varia de acordo com o processo de soldagem e suas condições de aplicação. Na soldagem MIG/MAG, por exemplo, a faixa típica de diluição costuma situar-se entre 30% e 50%. (ISQUIERDO *at al*, 2022).

2.4 APORTE TÉRMICO

No Processo de soldagem que utiliza o arco elétrico, ter uma fonte ideal que fornece calor necessário para fundir metal de adição e metal base, precisa de uma potência q , onde se desloca em linha reta num eixo de referência (X), com velocidade constante e , portanto, energia fornecida por unidade de comprimento fixa. Entretanto, para as aplicações usuais da Soldagem, o cálculo da potência gerada no arco (W ou J/s) através da seguinte relação apresentado na Equação 2 (SOUSA NETO, 2015; AVENTA, 2024).

$$q = \eta UI$$

Equação 2

Onde:

U [V volts] é a tensão

I [A Ampères] a intensidade da corrente de soldagem

η (Adimensional, variando entre 0 e 1) é o rendimento térmico do processo naquelas específicas condições.

Assim, este último fator indica a proporção da potência total gerada que é transferida para a peça soldada. Diversos pesquisadores avaliaram os rendimentos térmicos dos principais processos de soldagem, com os cada vez mais refinados (e exatos) métodos de medição, os valores encontrados têm sido modificados e são apresentados na Tabela 1 (MACHADO, 2022).

Tabela 1 Rendimento Térmico em Função do Processo de Soldagem

Processo	Rendimento [η]	Processo	Rendimento [η]
Arco Submerso	0,9 \pm 0,09	MIG/MAG	0,75+0,1
Eletrodo Revestido	0,75+0,1	Oxigás	0,52+0,27
Eletroescória	0,68+ 0,13	TIG (CC)	0,65+0,15
Feixe de Elétrons	0,87+0,8	TIG (CA)	0,35+0,15

Nota CC corrente contínuo eletrodo Negativo CA= Corrente Alternada.

Fonte: Adaptado de Machado (2022)

Desta forma, sendo v a velocidade de soldagem (mm/s), a quantidade de calor fornecida por unidade de comprimento do cordão de solda, ou simplesmente “energia de soldagem” (E , expressa em KJ/mm), é dada por:

$$E = \frac{q}{v} = \eta \frac{UI}{v} / 1000$$

Equação 3

E = Energia de soldagem ou Aporte Térmico [KJ/mm]

Q= quantidade de calor da solda [W]

V= velocidade de soldagem

U= tensão da soldagem [V]

I= Corrente da soldagem [A]

η = rendimento térmico do processo [adimensional]

Quando a velocidade de solda estiver expressa em cm/min deve-se utilizar a equação 4 para conversão das unidades e o valor o aporte térmico ser dado em KJ/mm.

$$E = \frac{q}{v} = \eta \frac{UI}{v} 0,006$$

equação4

Tabela 2 Aporte Térmico dos Processos de Soldagem e Suas Aplicações

Processo	E [KJ/mm] Mínimo	E [KJ/mm] Máximo	Metais e Ligas
Eletrodo Revestido	0,5	3,0	Todos aços , aço Inox, Ferro Fundido
Arco Submerso	1,0	10	Aço carbono, aço Inox, Ferro Fundido
TIG	0,3	1,5	Todos aços, Não Ferroso, Metais refratários e resistente a calor
MIG	0,5	3,0	Todos aços , aço inox e Não Ferroso
Eletroescória	5	50	Aços estruturais e Aço Inox
Feixe de Elétrons	0,1	0,6	Titânio, metis refratários e aços especiais.

Fonte: Nazaré (2022)

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido no laboratório de soldagem da Fatec Pindamonhangaba, onde foram utilizadas duas chapas de aço 1045 com as seguintes dimensões: 100 mm X 50 mm X 12,5 mm, a composição química foi fornecida pelo revendedor de Aço CONFER ilustrada na tabela 3

Tabela 3 Composição aço Peso em Porcentagem [%]

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,44	0,13	0,67	0,02	0,02	0,16

Fonte: Elaborado pelos autores

Nas duas condições testadas foram utilizados o processo de soldagem MIG, arame de diâmetro de 1,2 mm ER70S6, com o método empurrando, a máquina de soldagem MIG automática marca *Lincoln Electric modelo Power Wave S350* (Figura 9), com o gás de proteção Argônio Puro e com os parâmetros de soldagem que foram utilizados para cada técnica de soldagem, que estão descritos no trabalho de Nazaré (2022) e na Tabela 4.

Figura 9 Máquina soldagem automática MIG



Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 4 Parâmetros de Soldagem

PARÂMETROS	CP1	CP2
Voltagem [V]	30	30
Amperagem [A]	260	235
Velocidade do Arame [m/min]	8	6
Velocidade de Soldagem [cm/min]	30	30
Posição de Soldagem	1G	1G
Vazão gás Argônio [L/min]	15	15
Distância bico de contato [mm]	10	10
Ângulo de soldagem °	20	20

Fonte: Elaborado pelos autores

3.1 ESTUDO DA MICROESTRUTURA E MACROESTRUTURA

3.1.1 Macrografia da Solda

Após o processo de soldagem, as chapas soldadas foram cortadas ao meio (no sentido transversal do cordão de solda) com o auxílio da cortadeira mecanográfica Marca Teclago modelo CM80 ilustrada na (Figura 10) e na sequência retirado uma amostra de 10 mm de largura de cada chapa soldadas, totalizando 2 amostras onde foi identificado como CP1 e CP2.

Figura 10 Cortadeira Mecanográfica Marca Teclago modelo CM80



Fonte: Elaborado pelos autores

Posteriormente foi iniciado o processo de lixamento com a lixadeira marca Arotec modelo Aropol dupla ilustrada na Figura 11, com a seguinte sequência de Lixas: 180,220,320,400,500,600 mesh. Após esse processo as amostras foram levadas ao laboratório de Química, e realizado o ataque químico, como o método esfregando e com o reagente químico Nital 10% (ácido Nítrico 10ml e 90 ml de álcool etílico) mencionado no trabalho de Isquierdo (2022).

Figura 11 Lixadeira automática Marca Arotec modelo Aropol



Fonte: Elaborado pelos autores

Por final as amostras foram analisadas no estereoscópio marca Olympus modelo SZ com ampliação de 6,7x, demonstrado na Figura 12, com o objetivo de realizar aquisição de imagem do cordão de solda revelado pelo ataque químico e realizar as medições de penetração e área do cordão de solda.

Figura 12 Estereoscópio Marca Olympus modelo SZ



Fonte: Elaborado pelos autores

3.1.2 Micrografia da Solda

Após de realizar a macrografia nas amostras, as mesmas retornaram para o lixamento com a seguinte sequência: 600,800 1000,1200,1500 mesh e polimento com alumina com partícula de 0,3 microm. Na sequência realizou-se o ataque químico com Nital 2% (ácido Nítrico 2ml e 98 ml de álcool etílico) com a técnica por imersão por 10 segundos mencionado no trabalho de Isquierdo (2022). Com objetivo de analisar as microestruturas da região soldada e zona afetada termicamente e metal base, levaram-se as amostras para o microscópio marca Olympus modelo CX31 e realizou-se imagem de 500x de ampliação ilustrado na Figura 13.

Figura 13 Microscópio Marca Olympus modelo CX31



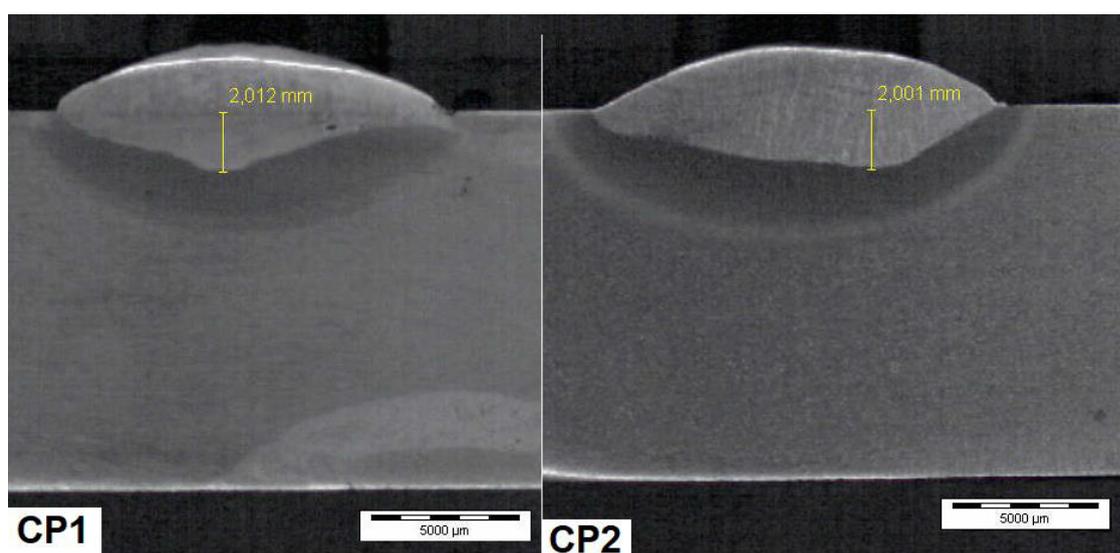
Fonte: Elaborado pelos autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO DA PENETRAÇÃO, DILUIÇÃO E APORTE TÉRMICO DA SOLDA

Ao observar a Figura 14 pode-se verificar que CP2 apresentou uma pequena diferença de penetração sendo praticamente igual demonstrando que a diferença de energia de soldagem não afetou a penetração que também observado por Castro; Pinheiro (2017).

Figura 14 Medida Penetração solda CP1 e CP2



Fonte: Elaborado pelos autores

Já a Tabela 5 é possível ver que o CP2 apresentou o menor valor de diluição que é de 43,34% e CP1 o valor de 48,66% um valor cerca de aproximadamente de 5 % maior e as duas soldas apresenta-se dentro dos valores, conforme Isquierdo *at al* (2022) que para aço baixo carbono o valor de diluição máximo é de 50%.

Tabela 5 cálculo da Diluição do CP1 e CP2

Técnica	CP1	CP2
Área Superior mm ² [A]	20,692	20,670
Área Inferior [mm ²] [B]	20,400	15,894
Área Total [A+B]	41,092	36,564
Diluição [%]	48,66	43,34

Fonte: Elaborado pelos autores

Ao analisar a Tabela 6 é possível verificar que o CP1 apresentou maior aporte térmico, sendo cerca de 10% quando comparado com CP2. Todos os valores estão conforme vistos no trabalho similar de Nazaré (2022).

Tabela 6 Cálculo do Aporte Térmico

Condições	CP1	CP2
Voltagem [V]	30	30
Amperagem [A]	260	235
η	0,75	0,75
Velocidade de soldagem [cm/min]	30	30
Aporte térmico KJ/mm	1,17	1,06

Fonte: Elaborado pelos autores

$$E = \frac{q}{v} = \eta \frac{UI}{v} 0,006$$

Equação 4

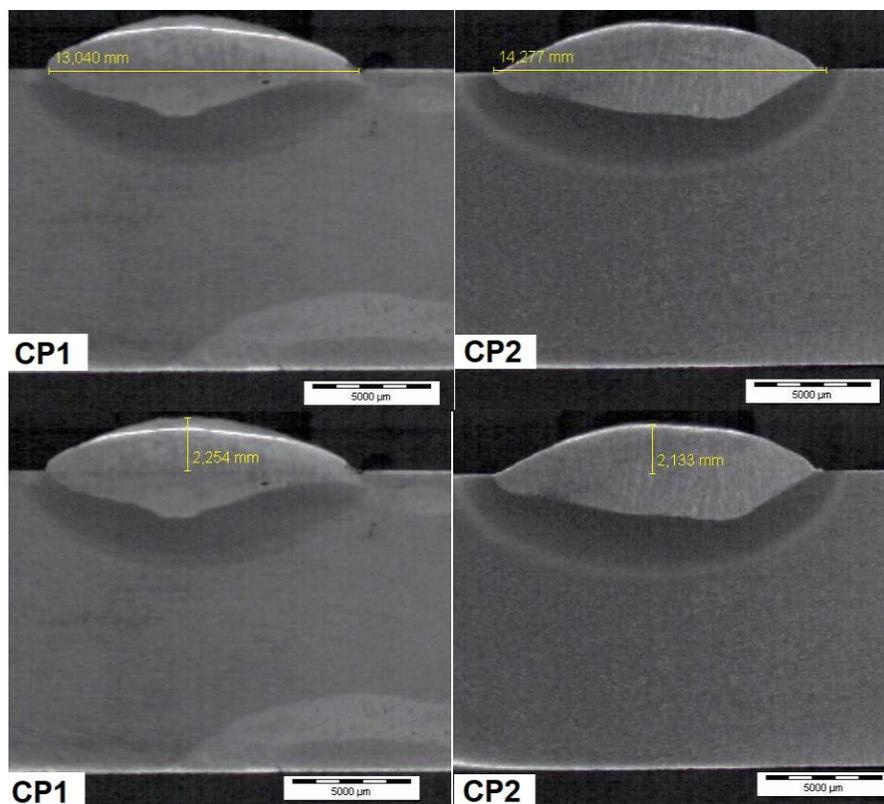
$$CP1 = 0,75 \cdot (30 \cdot 260) / 30 \cdot 0,006 = 1,17 \text{ KJ/mm}$$

$$CP2 = 0,75 \cdot (30 \cdot 235) / 30 \cdot 0,006 = 1,06 \text{ KJ/mm}$$

Ao analisar a Figura 15 pode-se observar que o CP1 apresentou uma largura da solda 13mm cerca de 10% menor que o CP2 que apresentou uma largura de 14,27 mm.

Já as medidas de altura o CP1 apresentou um valor de 2,54 mm sendo 10 % maior quando comparado com o CP2 que teve a Medida de altura de 2,13 mm.

Figura 15 Altura e largura do perfil de solda CP1 e CP2

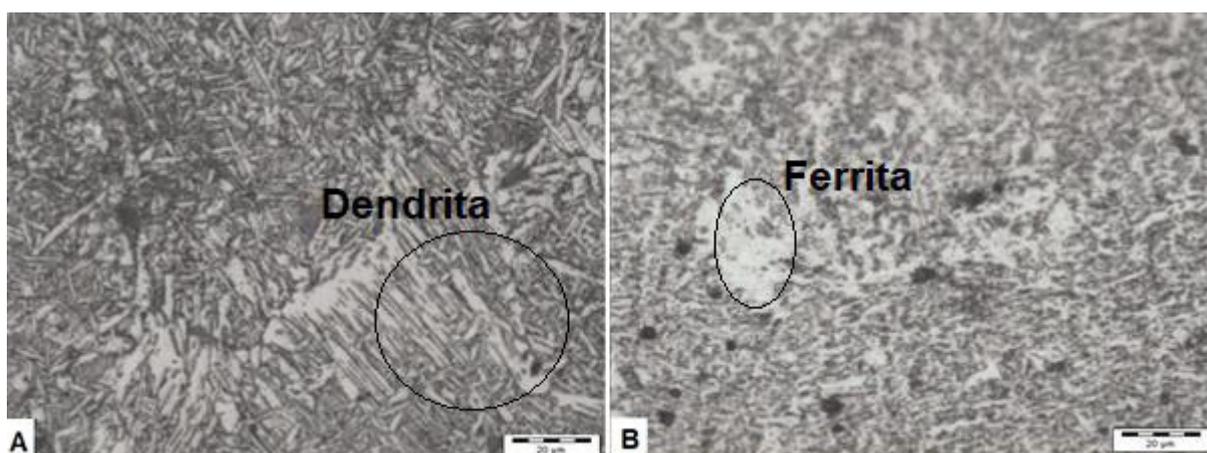


Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 MICROGRAFIA DA SOLDA

Ao observar a micrografia (Figura 16) da região soldada de todas as amostras, com o aumento de 500x e ataque de Nital 2%, foi possível observar a presença da estrutura Dendrítica e Ferrita.

Figura 16 Região da solda: A) CP1 B) CP2

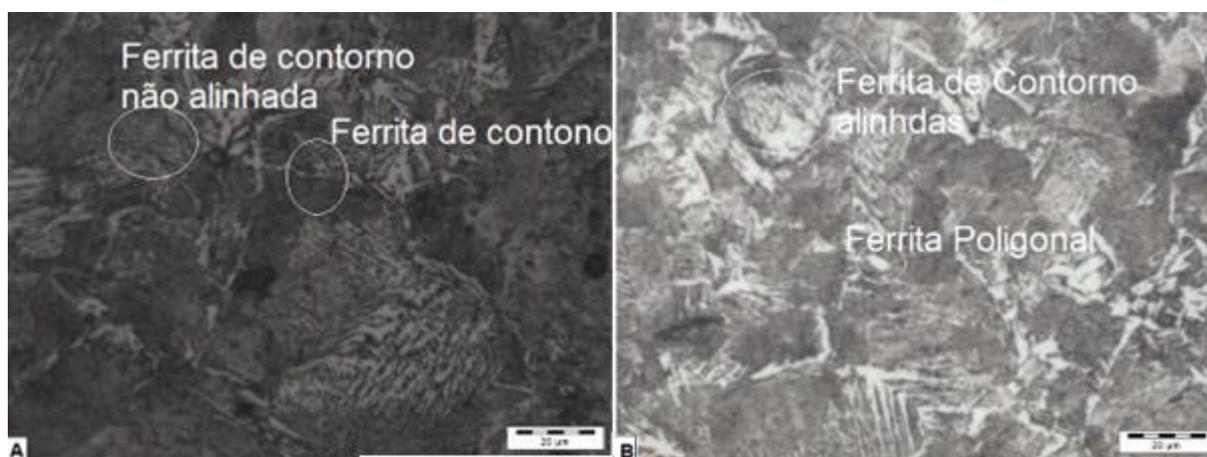


Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figuras 17 regiões da ZTA (Zona Térmica Afetada) A) CP1 B) CP2, com aumento de 500x e ataque de Nital 2%, foi possível identificar as mesmas estruturas presentes em todas as condições estudadas, indicando que a condição do fluxo também não afeta essa região da solda e não tem influência na formação das estruturas.

Pode-se verificar a presença de Ferrita com Segunda Fase não Alinhada, Ferrita Poligonal, Ferrita de contorno Alinhada e Ferrita de Segunda fase alinhada que são comuns nas ZTA das regiões soldadas como é observado por trabalho similares de Isquierdo *et al.*, (2022).

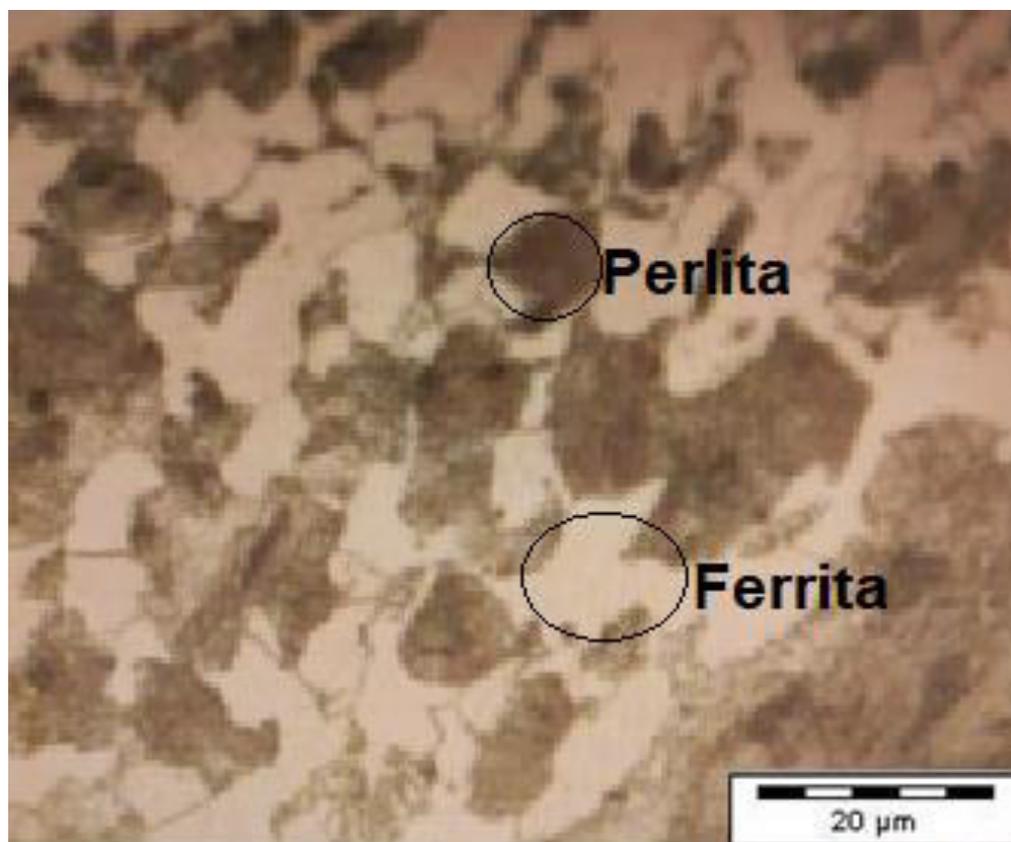
Figura 17 Microestrutura ZTA : A) CP1 , B) CP2



Fonte: Elaborado pelos autores

Já na Figura 18 a microestrutura do Metal Base com aumento de 500x com ataque Nital 2% é possível verificar a presença da Ferrita de cor branca e Perlita, a estrutura de cor escura que é característico de aço Médio carbono como é o caso do aço SAE 1045. Estas estruturas se repetem em todas as 2 chapas, são as estruturas características deste tipo de aço Médio carbono que também foi observado por (HOLANDA; LIMA; REBOUÇAS, 2019).

Figura 18 Estrutura do Metal Base



Fonte: Elaborado pelos autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados esperados com este projeto incluem a obtenção de dados experimentais que demonstrem a influência do aporte térmico na soldagem MIG/MAG na profundidade de penetração e na diluição do aço SAE 1045. Pretende-se também identificar os parâmetros ideais de soldagem para alcançar resultados ótimos nesse contexto.

Pode-se concluir que o aumento do aporte térmico, influencia no aumento direto da diluição, mas não afeta a medida da penetração e nem as estruturas formadas nas zonas Fundidas que foram observadas em ambas as amostras. Somente a presença das estruturas Dendrita e Ferrita e na ZTA da solda pode-se verificar a presença de Ferrita com Segunda Fase não Alinhada, Ferrita Poligonal, Ferrita de contorno Alinhada e Ferrita de Segunda fase alinhada nas duas amostras.

REFERÊNCIAS

AÇOS ROMAN. **SAE-1045 – Aplicações de Aços Especiais**. Disponível em: <<https://aco.com.br/aco/sae-1045-aco-carbono-especial/>> Acessado em: 03/04/2024.

AVENTA **Penetração da Solda: Saiba o que Influencia**. Disponível em <<https://aventa.com.br/novidades/penetracao-solda>> acessado em 27/03/2024.

BEPPLER, R. **Comparação da revelação entre reagentes metalográficos monocromáticos e de coloração nos aços SAE 1045, 4140, 52100, 304 e 420**. 2016 65P Monografia (Graduação) Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica Jaraguá do Sul. Instituto Federal de Santa Catarina. Jaraguá do Sul. Instituto 2016.

BRANDY **Kit Relação Brandy 1045 Titan 150**. Disponível em:<<https://loja.brandy.com.br/transmissao/kit-relacao-brandy-1045-titan-150>>. Acessado em: 03/04/2024.

CASTRO, J.; PINHEIRO, B.; MOTTA, M. **Estudo Da Variação Da DBCP e Do Ângulo De Soldagem Em Corrente Pulsada, Curto-Circuito Convencional e Curto-Circuito Controlado Em Soldagem Mig/Mag**. 72º Congresso Anual da ABM. Anais do Congresso Anual da ABM. ISSN 2594-5327. v. 72, n. 1, 2017.

CASTRO, J. N.; PINHEIRO, B. R; M. M. F., **Estudo Da Variação da DBCP e do Ângulo de Soldagem em Corrente Pulsada, Curto-Circuito Convencional e Curto-Circuito Controlado Em Soldagem Mig/Mag** 72º Congresso Anual da ABM, Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

CESAR. P. **Dominando a Solda MIG: Componentes e Dicas**. Disponível em: <<https://alusolda.com.br/dominando-a-solda-mig-componentes-e-dicas/>>. Acessado em: 02/04/2024

COSTA, A. F.; VENDRAMINI, J. R. RIBEIRO, V. M. **Análise De Desgaste Dos Revestimentos Por Soldagem Para Recuperação Das Guias Do Carro Alimentador Da Caixa Matriz Fabricadas Em Aço Sae 1045**. Revista Vincci-Periódico Científico do UniSATC, v. 4, n. 2, p. 149-178, 2019.

FARIA, I. C. S; FILLETI, R.A.P; HELLENO, A.L **Evolução dos Processos de Automação em Células de Soldagem: Uma Revisão da Literatura**. Soldagem e Inspeção 2022.

FORTES, C. **Apostila de Eletrodos Revestidos-ESAB**. Disponível em:<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodo_srevestidos_ok.pdf>. Acesso em 27 de fevereiro de 2024.

FORTES, C. **Apostila de Arames Tubulares-ESAB**. Disponível em:<http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramest_ubulares_ok.pdf>. Acesso em 1 de março de 2024.

GANDELMAN, Ariel Dov Ber. **Dureza ao Riscamento e Coeficiente de Atrito de Revestimentos de Inconel 625 Depositados pelo Processo TIG Alimentado com duplo Arame Aquecido**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em

Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2017.

HOLANDA, G. B.; LIMA, D. A.; REBOUÇAS FILHO, P. P., **Uma Nova Abordagem para a Medição da Diluição de Soldagem, Baseada nos Pontos de Inflexão de um Contorno Ativo**. Revista Matéria, v.24, n.1, 2019.

ISQUIERDO, D.V.; FRANÇA, E.O; MONTEIRO, M.V.; SANTOS, R. W. M.; Junior Ribeiro, S.; MONTORO S. R. **Análise da soldagem MIG no Aço SAE 1045 Variando a Técnica Empurrando e Puxando**. XXVI Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, XXII Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação e XII Encontro de Iniciação à Docência - Universidade do Vale do Paraíba – 2022.

KOSINSKI, Guilherme. **Análise do cordão de solda no processo de soldagem MAG utilizando os aços SAE 1020 e SAE 1045**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MACHADO, I. **Tratamentos Térmicos E De Superfície**. Disponível em: < chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/Tratamento_termico_e_superficial.pdf> Acessado em: 02/04/2024.

MACHADO, I. G. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações** Disponível em :< https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/213605/0011180_59.pdf?sequence=1>. Acessado em 10/10/2022.

MAGNI **Ensaio Metalográficos** Disponível em: <https://www.magnibrasil.com.br/site/?navega=paginas&id_pag=18&id=49> Acessado em: 02/04/2024.

MARQUES, P. V. MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q . **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

MATTOZO, Thiago Giovani. **Análise comparativa em soldas com e sem pré-aquecimento no aço carbono SAE 1045**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MIGUEL, D.; COELHO, J. **Análise Do Perfil Do Cordão De Solda Variando A Energia Empregada No Processo De Soldagem**. 2022. Projeto de pesquisa. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

NAZARÉ, V. D. M. **Estudo da Profundidade e Diluição do Aço A36 com a Variação da Inlinação do Ângulo da Tocha no Processo MIG (GMAW)**. 2022. 46p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2022.

QATM **Embutimento a Frio Material de Consumo** Disponível em: < https://www.qatm.com.br/pt/produtos/materiais-de-consumo/embuidora/embutimento-a-frio/> Acessado em: 02/04/2024.

REIS, M.C; RUTTER, W.H. **Soldagem e Caracterização do Revestimento de Inconel 625 pelo Processo de Eletrodo Revestido (SMAW) Sobre Aço SAE 1020**. 2014 64 fls. Trabalho de Graduação (Graduação Processo Metalúrgicos) - Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, 2014.

RIBEIRO, Júlio César Bento. **Análise de Técnicas para a Soldagem TIG Automatizada**. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

ROHDE, R. A **Metalografia Preparação de Amostras** Disponível em: < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf>. Acessado em: 02/04/2024.

SOARES, R.; PEREIRA, S. **Avaliação da Dureza na ZTA do Aço SAE 1045 Variando a Temperatura de Pré-aquecimento do Processo GMAW**. 2022. Monografia. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba.

SOUZA NETO, E.C., **Avaliação da Resistência ao Desgaste de Revestimentos Duros Aplicados por Soldagem em Martelo Triturados de Baterias Automotivas**. Dissertação mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e tecnologia, 2015.

UTMAXX **Solda de Inox** Disponível em: <https://www.utmaax.com.br/solda-aco-inox> Acessado em: 02/04/2024.