

ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DOUGLAS SAMUEL SOUSA VIEIRA

**COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DOS MÉTODOS DE SOLDAGEM MIG,
ELETRODO REVESTIDO E TIG**

GOIANÉSIA/GO

2021

2021	COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DOS MÉTODOS DE SOLDAGEM MIG, ELETRODO REVESTIDO E TIG DOUGLAS SAMUEL SOUSA VIEIRA	FACEG
------	--	-------

DOUGLAS SAMUEL SOUSA VIEIRA

**COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DOS MÉTODOS DE SOLDAGEM MIG,
ELETRODO REVESTIDO E TIG**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA/GO

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

F333s

VIEIRA, Douglas Samuel Sousa.

Comparação dos custos dos métodos de soldagem MIG, eletrodo revestido e TIG / Douglas Samuel Sousa Vieira – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2021.
47 p.; il. p&b.

Orientador: Profa. Ariane Martins Caponi Lima.

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

I. Vieira, Douglas Samuel Sousa.

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, D. S. S. **Comparação dos custos dos métodos de soldagem MG, eletrodo revestido e TIG.** Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia-GO, 2021.


CESSÃO DE DIREITOS

NOME: Douglas Samuel Sousa Vieira

GRAU: BACHAREL

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: Douglas Samuel Sousa Vieira

CPF: 04347109113

Endereço: Setor universitário

Email: douglassamuel1999@hotmail.com

DOUGLAS SAMUEL SOUSA VIEIRA

**COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DOS MÉTODOS DE SOLDAGEM MIG,
ELETRODO REVESTIDO E TIG**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Goianésia, 15 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ariane Martins Caponi Lima - Orientador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Profa. Dra. Lauriane Santin - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Prof. Dr. Thiago Ferreira da Cunha - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

Dedicatória ou Epígrafe:

Primeiramente dedico esse trabalho a Deus, que foi um verdadeiro guia nessa jornada tão difícil, mas que me ensinou tanto. Sem a sua infinita sabedoria, jamais teria conseguido, e em especial aos meus pais Vanderlei Vieira e Roselene de Sousa, aos meus avós paternos e maternos em especial a minha madrinha e avó Madalena Divina e aos meus irmãos Daniel Vinicius e Diogo Augusto, que sempre me amaram e me deram total suporte para enfrentar os desafios e acreditarem no meu sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, e em segundo Nossa Senhora Aparecida que meu deu saúde e forças para superar todos os momentos difíceis a que eu me deparei ao longo da minha graduação, ao meu pai Vanderlei Vieira e minha mãe Roselene de Sousa, por serem essenciais na minha vida e nunca me deixaram desistir, sempre me apoiando e me incentivando a ser cada dia melhor e a toda minha família e amigos por me incentivarem e não me deixarem desistir dos meus sonhos.

À minha orientadora Ariane Caponi por todo apoio e paciência ao longo da elaboração do meu projeto final. Também gostaria de deixar um agradecimento especial a instituição Faculdade Evangélica de Goianésia, por possibilitar a execução deste trabalho. Aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante toda essa caminhada, ajudando nos trabalhos, nos estudos, na amizade e fortalecendo o espírito de equipe, pois, uma conquista é o resultado da soma de esforços que se dá por meio da união de várias pessoas.

Agradeço também, em especial a meu amigo Anderson Januário em que não mediu esforços a me ajudar a realizar pesquisas e experimentos referentes a esse trabalho, e também a empresa Gsv Montagens, que abriu as portas para a realização dos testes.

RESUMO

Devido à ampla aplicação da tecnologia de soldagem nas principais indústrias de fabricação, várias técnicas de soldagem foram adotadas, fazendo-se necessário entender quais as vantagens e desvantagens de cada uma, principalmente do ponto de vista econômico. Entre as diversas técnicas de soldagem, a soldagem MIG e TIG se destacam devido a algumas de suas vantagens, como baixo custo de equipamento e capacidade de soldar vários metais e ligas. Também, a soldagem a eletrodo revestido é a principal técnica de soldagem nas indústrias automotiva e de eletrodomésticos, despertando o interesse em avaliar também este método de junção. Dessa forma, buscou-se analisar a viabilidade econômica do processo de soldagem MIG, TIG e eletrodo revestido do aço carbono A-36. Para isso, realizou-se uma pesquisa experimental com 30 corpos de prova, a fim de se medir o tempo e os insumos necessários para se realizar cada um dos processos de solda e observar qual das técnicas é a mais economicamente viável. Ademais, realizou-se também ensaios de tração e dureza para se verificar as características físicas dos corpos de prova e avaliar a qualidade inerente a cada processo. Com isso, concluiu-se que o processo MIG é o mais econômico entre os três métodos, apresentando 38,4% do custo do processo TIG e 43,7% do processo com Eletrodo Revestido. Além disso, foi o método que apresentou maior dureza entre os três e um limite de resistência similar ao processo TIG, com o corpo de prova fabricado com Eletrodo Revestido sendo o que apresentou menor limite de resistência à tração.

Palavras-chaves: Eletrodo Revestido. MIG. TIG. Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

Due to the wide application of welding technology in the main manufacturing industries, several welding techniques were adopted, making it necessary to understand the advantages and disadvantages of each one, mainly from an economic point of view. Among the various welding techniques, MIG and TIG welding stand out due to some of their advantages, such as low equipment cost and the ability to weld various metals and alloys. Also, coated electrode welding is the main welding technique in the automotive and household appliance industries, arousing interest in evaluating this joining method as well. Thus, we sought to analyze the economic feasibility of the welding process MIG, TIG and coated electrode of carbon steel A-36. For that, experimental research was carried out with 30 specimens, in order to measure the time and the necessary inputs to carry out each one of the welding processes and to observe which of the techniques is the most economically viable. Furthermore, tensile and hardness tests were also carried out to verify the physical characteristics of the specimens and evaluate the inherent quality of each process. Thus, it was concluded that the MIG process is the most economical among the three methods, presenting 38.4% of the cost of the TIG process and 43.7% of the process with Coated Electrode. In addition, it was the method that presented the highest hardness among the three and a resistance limit similar to the TIG process, with the specimen manufactured with Coated Electrode being the one with the lowest tensile strength limit.

Key words: Coated electrode. MIG. TIG. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de soldagem por fusão e terminologias envolvidas.	17
Figura 2 - Execução de uma solda de vários passes	17
Figura 3 - Processo de soldagem com eletrodo revestido	24
Figura 4 - Processo de soldagem MIG de um dos corpos de prova a serem analisados.	27
Figura 5 - Corpos de prova numerados e identificados quanto ao tipo de processo de soldagem empregado.	27
Figura 6 - Microdurômetro utilizado nos ensaios de dureza.	29
Figura 7 - Máquina de ensaio de tração utilizada na pesquisa.	29
Figura 8 - Corpo de prova soldado com eletrodo revestido antes (A) e depois (B) do ensaio de tração	34
Figura 9 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido	34
Figura 10 - Metalografia da ZTA do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido.....	35
Figura 11 - Metalografia do local de solda do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido.	35
Figura 12 - Análise macrográfica do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido.....	36
Figura 13 - Corpo de prova soldado via processo TIG antes (A) e depois (B) do ensaio de tração	37
Figura 14 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração do corpo de prova soldado via processo TIG	37
Figura 15 - Metalografia da ZTA do corpo de prova soldado via processo TIG.	38
Figura 16 - Metalografia do metal base do corpo de prova soldado via processo TIG.....	39
Figura 17 - Metalografia do local de solda do corpo de prova soldado via processo TIG.....	39
Figura 18 - Análise macrográfica do corpo de prova soldado via processo TIG	40
Figura 19 - Corpo de prova soldado via processo MIG antes (A) e depois (B) do ensaio de tração	41
Figura 20 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração do corpo de prova soldado via processo MIG	41
Figura 21 - Metalografia da ZTA do corpo de prova soldado via processo MIG.	42
Figura 22 - Metalografia do metal base do corpo de prova soldado via processo MIG.....	43
Figura 23 - Metalografia do local de solda do corpo de prova soldado via processo MIG.....	43
Figura 24 - Análise macrográfica do corpo de prova soldado via processo MIG	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração química do aço carbono A-36.....	19
Tabela 2 - Atributos físicos do aço carbono A-36.....	19
Tabela 3 – Consumíveis utilizados para cada técnica de soldagem	28
Tabela 4 - Dados de tempo, em minutos, para cada processo de solda.....	31
Tabela 5 - Quantias de eletrodos e gases consumíveis utilizados no processo de solda de cada corpo de prova	32
Tabela 6 - Custo dos consumíveis utilizados em cada processo de soldagem. Custo dos eletrodos expressos por kg, dos gases por metro cúbico e do profissional soldador por hora.	32
Tabela 7 - Custo total médio de cada processo de soldagem	33
Tabela 8 - Ensaio de dureza do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido	36
Tabela 9 - Ensaio de dureza do corpo de prova soldado via processo TIG.....	40
Tabela 10 - Ensaio de dureza do corpo de prova soldado via processo MIG.....	44
Tabela 11 – Resultados dos parâmetros avaliados no trabalho para os três métodos de soldagem.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZTA	Zona termicamente afetada
MIG	Gás inerte de metal
TIG	Gás inerte de tungstênio
FACEG	Faculdade Evangélica Goianésia
USW	Soldagem ultrassônica
SAW	Soldagem por arco submerso
LBW	Soldagem por feixe de laser
EBW	Soldagem por feixe de elétrons
RSW	Soldagem por pontos
FSW	Soldagem por fricção e agitação
PAW	Soldagem a arco de plasma
ISO	Organização Internacional de Normalização

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Objetivos específico	15
1.4	Problema de pesquisa	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Características gerais	16
2.1.1	Soldabilidade	16
2.1.2	Defeitos da solda	18
2.1.3	Aço carbono A-36	19
2.2	Soldagem TIG	20
2.3	Soldagem MIG	22
2.4	Soldagem de eletrodo revestido	23
2.5	Custos	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	Método experimental	26
3.2	Análise do custo de soldagem	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Dados coletados durante o processo de soldagem	31
4.2	Dados coletados através dos ensaios	33
4.2.1	Eletrodo Revestido	33
4.2.2	TIG	36
4.2.3	MIG	40
4.3	Comparação dos métodos de soldagem	44
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação de grande relevância que envolve a união de dois metais (semelhantes ou não), aquecendo-os até o estado fundido para formar uma ligação após a solidificação (SEN *et al.*, 2018). Devido à ampla aplicação da tecnologia de soldagem nas principais indústrias, como construção, marinha, ferrovia, aeroespacial e automotiva, várias técnicas de soldagem foram adotadas. Algumas dessas técnicas de soldagem incluem soldagem com gás inerte de metal (MIG – do inglês *Metal Inert Gas*), soldagem com gás inerte de tungstênio (TIG - do inglês *Tungsten Inert Gas*), soldagem ultrassônica (USW), soldagem por arco submerso (SAW), soldagem por feixe de laser (LBW), soldagem por feixe de elétrons (EBW), soldagem por pontos (RSW), soldagem por fricção e agitação (FSW) e soldagem a arco de plasma (PAW) (BU; GARDNER, 2019).

1.1 Justificativa

Entre todas essas técnicas de soldagem, a soldagem a arco, especialmente a soldagem MIG e TIG, se destacam devido a algumas de suas vantagens sobre outros processos de união. Essas vantagens incluem baixo custo de equipamento, capacidade de soldar vários metais e ligas, alta eficiência elétrica e menos preparação de metal base (KUMAR; AJAY; MILTON, 2016).

De acordo com Santiago, Freitas e Crasto (2012), o aço ASTM A36 é o aço laminado a quente mais comumente disponível. Geralmente está disponível em haste redonda, barra quadrada, barra retangular, bem como em viga I e viga H. Ele encontra sua aplicação em áreas como construção de pontes, navios, estruturas de máquina e ferrovias. A união de duas ou mais partes da peça pela operação de soldagem, ou junta de soldagem, pode ser uma tarefa difícil em algumas indústrias, com o problema de rachaduras e propriedades mecânicas alteradas em comparação com o material original.

1.2 Objetivos

Analisar a viabilidade econômica do processo de soldagem MIG, TIG e eletrodo revestido do aço carbono A-36.

1.3 Objetivos específico

- Avaliar a velocidade, qualidade e descontinuidade de cada processo de solda nos corpos de prova;
- Realizar ensaios de dureza e tração para a coleta dos dados;
- Analisar a viabilidade econômica dos processos de soldagem MIG, TIG e eletrodo revestido.

1.4 Problema de pesquisa

Este trabalho aborda como problema de pesquisa a pergunta: Qual o método de soldagem entre MIG, eletrodo revestido e TIG terá um menor custo para o aço A36?

Tem-se a hipótese de que não há um único método de soldagem de menor custo para todas as situações, devendo ser avaliada qual técnica deve ser empregada e quais os custos atrelados a ela.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características gerais

Todos os processos de soldagem a arco são adequados para a soldagem de aços carbono. A escolha do processo mais adequado a ser usado para uma aplicação específica deve levar em consideração não apenas as características do material (soldabilidade ou sensibilidade à defeitos), mas também os detalhes da junta (espessura da placa, desenho da junta, posição de soldagem e localização) e economia de solda (taxas de deposição e eficiências, custo de mão de obra, custo de consumíveis, custo de capital de equipamento, custo de configuração e limpeza etc.) (DAVIS, 2006).

2.1.1 Soldabilidade

De acordo com *American Welding Society* (2003, p. 10, apud ALLGAYER, 2017, p. 19) a soldabilidade é caracterizada como “a possibilidade de um material ser soldado nas exigências de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma propícia e de se comportar adequadamente em serviço”.

Soldabilidade está relacionado à capacidade de um metal de produzir soldas sem defeitos. Existem vários defeitos de solda que podem ocorrer durante a fabricação, e estes podem ser separados em defeitos relacionados ao processo e procedimentos de soldagem e aqueles associados ao material. Por exemplo, defeitos como falta de fusão e inclusões de escória estão relacionados principalmente ao processo de soldagem e geralmente podem ser evitados por mudanças nas condições do processo. Defeitos como trincas de solidificação e fissuras induzidas por hidrogênio estão principalmente relacionados às características metalúrgicas do material e geralmente são difíceis de eliminar apenas por mudanças nas condições do processo (MODENESI, 2008).

No processo de solda, o metal a ser soldado, dito como metal base, é escolhido conforme sua soldabilidade, devendo ser adequada para a situação. Há a aplicação de metal de adição, que é adicionado em estado líquido durante a soldagem por fusão. Este material é especificado por órgãos nacionais e internacionais como a *American Welding Society* e ISO, deve ser selecionado de acordo com as características do metal base e da aplicação da junta final (MODENESI, 2008).

Na soldagem por fusão (Figura 1), diz-se poça de fusão a região que, momentaneamente, está em fusão. A distância da superfície original ao ponto em que termina a fusão, medida perpendicularmente, é chamada de penetração da solda (MODENESI, 2008).

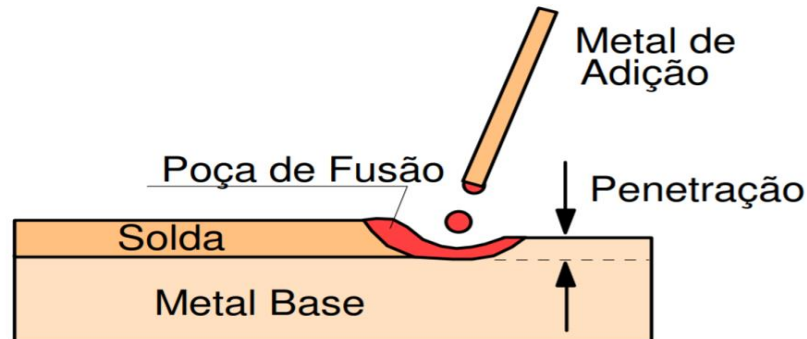


Figura 1 - Processo de soldagem por fusão e terminologias envolvidas.

Fonte: Modenesi (2008, p. 1)

Também têm-se outras terminologias associadas ao processo de soldagem, como raiz, caracterizada pela região mais profunda de um cordão de solda; face, a superfície oposta à raiz de solda; passe, o depósito de metal obtido após a progressão sucessiva de uma só poça de fusão; camada, conjunto de passes localizados em uma mesma altura da peça; reforço, altura máxima alcançada pelo excesso de material de adição, medida a partir da superfície do material de base e margem, que é a linha entre a superfície do metal de base e a face da solda (MODENESI, 2008).

Todos estes termos estão ilustrados na Figura 2.

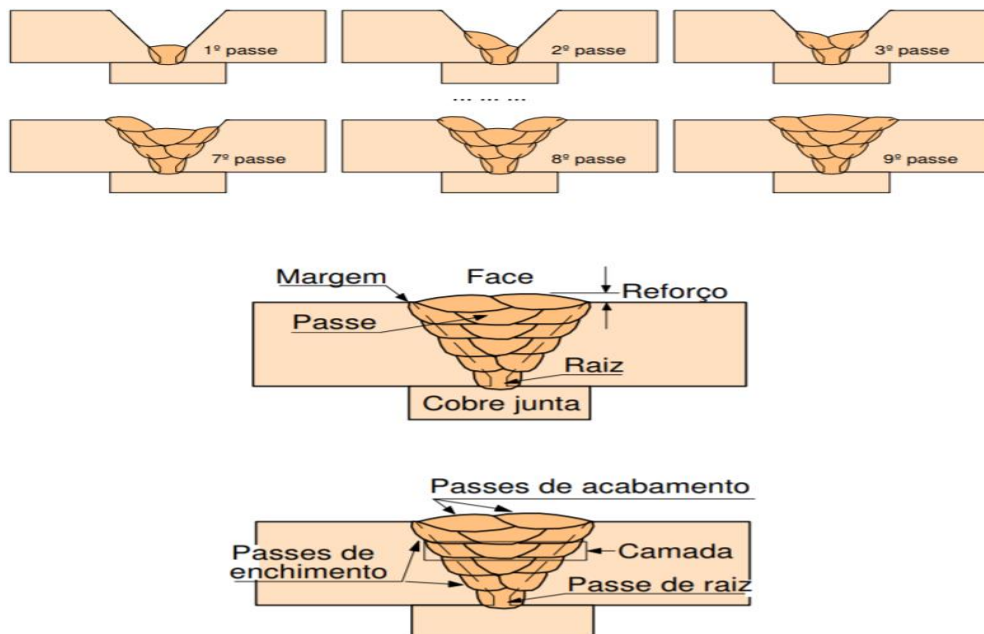


Figura 2 - Execução de uma solda de vários passes

Fonte: Modenesi (2008, p. 4)

Podem acontecer defeitos no processo de soldagem de duas peças metálicas, descritas a seguir, sendo sempre importante identificar as terminologias e seguir sempre um padrão, para assim poder identificar os defeitos e solucioná-los.

2.1.2 Defeitos da solda

Existem muitos exemplos de estruturas soldadas que estão livres de defeitos de fabricação que posteriormente falham em serviço. Isso inclui modos de falha envolvendo corrosão, fadiga, ruptura por tensão (fluência), altas temperaturas de trabalho ou combinações complexas desses e de outros mecanismos de falha. Os modos de falha relacionados ao serviço são talvez os mais sérios dos problemas de soldabilidade, uma vez que a falha por esses mecanismos pode muitas vezes ser inesperada e catastrófica (RAMAKRISHNAN, 1972).

Defeitos relacionados à fabricação incluem fenômenos de trinca que estão associados à natureza metalúrgica da soldagem e defeitos relacionados ao processo e/ou procedimento. Os defeitos associados ao comportamento metalúrgico do material podem ser amplamente agrupados pela faixa de temperatura em que ocorrem, como o defeito por craqueamento (RAMAKRISHNAN, 1972).

O craqueamento a quente inclui aqueles fenômenos de craqueamento associados à presença de líquido na microestrutura e ocorre na zona de fusão e zona termicamente afetada (ZTA). Os filmes líquidos ao longo dos limites dos grãos geralmente estão associados a essa forma de rachadura (RAMAKRISHNAN, 1972).

O craqueamento morno ocorre em temperatura elevada no estado sólido, ou seja, nenhum líquido está presente na microestrutura. Esses defeitos podem ocorrer na zona de fusão e na ZTA. Todos os fenômenos de craqueamento a morno estão associados a limites de grãos (RAMAKRISHNAN, 1972).

O craqueamento a frio ocorre à temperatura ambiente ou próximo a ela e geralmente é sinônimo de craqueamento induzido por hidrogênio. Esta forma de rachadura pode ser intergranular ou trans granular (RAMAKRISHNAN, 1972).

Uma série de defeitos não metalúrgicos que podem ocorrer durante a fabricação, geralmente, estão associados a um controle de processo/procedimento insatisfatório e incluem falta de fusão, penetração incompleta da junta e defeitos geométricos. Esses defeitos geralmente podem ser corrigidos com atenção cuidadosa às condições do processo, ao projeto da junta, à preparação do material (limpeza), etc. (RAMAKRISHNAN, 1972).

Diversas ligas metálicas podem ser unidas pelo processo de solda. Neste trabalho, estudou-se a solda do aço carbono A-36 pois é comumente o mais utilizado pelo fato de se ter uma baixa quantidade de carbono, esse aço tem um alto índice de soldabilidade, usinabilidade e etc.

2.1.3 Aço carbono A-36

O Aço carbono A36 é um aço ferrítico de baixa liga contendo 0,29% em peso de carbono, 0,80-1,20% em peso de manganês e 0,15-0,30% em peso de silício. Este material é amplamente utilizado para o interior de vasos de pressão e estruturas de suporte (MURTY *et al.*, 1998).

A configuração química e os atributos do aço ASTM A36 são delineados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Configuração química do aço carbono A-36

Elemento	Peso %
Fe	98,11
C	0,29
Mn	1,03
P	0,039
S	0,05
Si	0,28
Cu	0,20

Fonte: Sastry *et al.* (2019)

Tabela 2 - Atributos físicos do aço carbono A-36

Atributos	Unidades
Densidade	7845 kg/m ³
Resistência à tração	590 MPa
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Capacidade calorífica	0,486 kJ/kg.K
Condutividade térmica	50,7 W/m.K
Ponto de fusão	1521 °C

Fonte: Sastry *et al.* (2019)

O aço carbono A-36 pode ser soldado a partir de diversas técnicas de soldagem. Foram escolhidas três para serem estudadas: TIG, MIG e eletrodo revestido, pois esses três processos são os mais utilizados nas indústrias de fabricação e soldagem.

2.2 Soldagem TIG

Schwedersky *et al.* (2011, p. 334) classificam a soldagem TIG como:

O processo TIG (Tungsten Inert Gas) é considerado tradicionalmente um processo aplicado com baixa velocidade de soldagem, e também por isso, classificado popularmente como um processo de baixa produtividade. Essa classificação ocorre também devido aos problemas encontrados quando se busca utilizar o processo TIG de forma autógena com velocidade de soldagem elevada, pois, dessa forma, é necessário que a corrente de soldagem também seja elevada para manter o cordão com tamanho satisfatório (SCHWEDERSKY *et al.* 2011, p. 334).

Desenvolvido em 1938, o processo TIG é amplamente difundido na indústria devido à qualidade do cordão de solda resultante. Nesse processo, um arco elétrico é criado entre um eletrodo de tungstênio e o metal base. A energia do arco é suficiente para derreter o metal e o gás de proteção evita a oxidação do cordão de solda. Porém, o processo de soldagem TIG permite a soldagem, em uma única passagem, de espessura máxima de 3 mm para aços inoxidáveis. Como resultado, a produtividade do TIG é baixa (TANAKA *et al.*, 2000).

O processo de soldagem TIG envolve uma série de parâmetros do processo de soldagem, como abertura do arco, relação de polaridade, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do metal de adição e corrente de soldagem. A qualidade das soldas depende muito da seleção destes parâmetros (TARNG; YANG, 1998).

A soldagem TIG pode ser feita com ou sem metal de adição. Quando o metal de adição é usado, ele é adicionado diretamente na poça de fusão, mergulhando a extremidade do arame na poça de fusão. Quando o metal de adição não é usado, as bordas do metal são aquecidas, derretidas e fluidas juntas por si mesmas, e, conforme o metal derretido esfria, ocorre coalescência e as peças são unidas, resultando em solda exigindo acabamento mínimo (KUMAR, A.; SUNDARRAJAN, 2009).

O uso comum de TIG como técnica de soldagem tem sido associado às suas soldas de alta qualidade, o que é atribuível ao alto grau de controle da entrada de calor e adição de metal. O TIG encontrou amplo reconhecimento em áreas onde a soldagem de precisão é necessária,

como aeronaves, indústrias químicas e de instrumentos, indústria nuclear, indústria alimentícia, trabalhos de manutenção e reparo e algumas áreas de manufatura (KUMAR, S.; SHAHI, 2011).

A corrente de soldagem é a variável mais influente no processo de soldagem a arco, que controla a taxa de queima do eletrodo, a penetração e a geometria das soldagens. A corrente tem influência direta na forma do cordão de solda, na velocidade de soldagem e na qualidade da solda. A maioria das soldas TIG emprega corrente direta porque produz maior profundidade de penetração da solda e maior velocidade de deslocamento do que na corrente reversa. Além disso, a corrente reversa produz rápido aquecimento e degradação da ponta do eletrodo, já que o ânodo é mais aquecido do que o cátodo (SEO; JEON; LIM, 2004).

Uma corrente mais alta na soldagem TIG pode causar respingos e danos à peça de trabalho, já a configuração de corrente mais baixa leva a uma maior aderência do metal de adição. Às vezes, uma maior área afetada pelo calor pode ser observada quando se utiliza uma menor corrente de soldagem, já que altas temperaturas precisam ser aplicadas por períodos mais longos de tempo para depositar a mesma quantidade de materiais de adição (ATMA; VARGHESE, 2014).

Outro parâmetro crítico no processo de soldagem TIG, é a diferença de potencial elétrico entre a ponta do fio de soldagem e a superfície da poça de fusão. A tensão de soldagem pode ser fixa ou ajustável dependendo do equipamento de soldagem. Ela determina a forma da zona de fusão e do reforço de solda. Uma alta tensão inicial permite fácil iniciação do arco e uma faixa maior de distância da ponta de trabalho. No entanto, isto produz soldas mais largas, planas e de penetração menos profunda do que as baixas tensões de soldagem (TEWARI; GUPTA; PRAKASH, 2010).

A velocidade de soldagem é definida como a taxa de deslocamento do eletrodo ao longo do metal base. A velocidade de soldagem é um parâmetro importante para a soldagem TIG. O efeito de aumentar a velocidade de soldagem para a mesma corrente e tensão é reduzir o aporte de calor. O aumento da velocidade de soldagem produz uma diminuição na área da seção transversal da solda e, conseqüentemente, a profundidade de penetração e a largura da solda também diminuem. As velocidades normais de soldagem são de 100 a 500 mm/min, dependendo da corrente, tipo de material e espessura da placa a ser trabalhada (HUSSAIN; LATEEF; JAVED, 2010).

O aporte de calor é uma medida relativa da energia transferida por unidade de comprimento de solda. Quanto maior a entrada de calor, mais lenta é a taxa de resfriamento. Por outro lado, quanto menor a entrada de calor, mais rápida é a taxa de resfriamento. Portanto, assim como a temperatura de pré-aquecimento e interpasse, a entrada de calor é uma

característica importante que influencia a taxa de resfriamento, que pode afetar as propriedades mecânicas e a estrutura metalúrgica da solda e da ZTA (YURI *et al.*, 2000).

Na soldagem TIG, é conhecido que a energia é transferida do eletrodo de soldagem para o metal base por um arco elétrico. Ao iniciar o arco, uma quantidade suficiente de energia é fornecida ao eletrodo. Consequentemente, tanto o metal base quanto o metal de adição são derretidos para criar a solda. A entrada de calor é normalmente calculada como a razão da energia (tensão x corrente) para a velocidade da fonte de calor, ou seja, o arco (KUMAR, S.; SHAHI, 2011).

Gases de proteção são usados no processo TIG para evitar a contaminação atmosférica do metal de solda. Essa contaminação pode produzir porosidade, rachaduras na solda, incrustações e até mesmo alteração na composição química do material fundido. Ademais, o gás de proteção também tem grande influência na estabilidade do arco elétrico. Gases com baixo potencial de ionização facilitam a ignição do arco elétrico e aqueles com baixa condutividade térmica tendem a aumentar a estabilidade do arco. Argônio é o gás de proteção mais usado no processo TIG, possuindo baixo potencial de ionização e sendo mais pesado que o ar, proporcionando uma excelente proteção da poça de fusão. Além disso, é mais barato que o hélio, o outro gás de proteção inerte usado no processo. O gás de proteção flui para fora da tocha de soldagem, envolvendo o tungstênio quente e o metal de solda fundido, e desloca o ar (oxigênio e nitrogênio), evitando assim que o ar entre em contato com o metal fundido ou com o eletrodo de tungstênio quente (KANG *et al.*, 2009).

2.3 Soldagem MIG

O processo de gás inerte de metal (MIG) é uma técnica de soldagem a arco amplamente utilizada na indústria. Alta produtividade, flexibilidade e baixo custo tornam este processo adequado para uma ampla gama de aplicações industriais. Essa técnica utiliza um eletrodo de fio consumível que se funde no arco elétrico entre a peça e a ponta. O arco e a poça de fusão são protegidos por um gás de proteção fornecido pela pistola de solda. Inovações contínuas aumentaram a qualidade e a produtividade da soldagem. A principal evolução é o MIG pulsado, que usa uma corrente de soldagem pulsada. Este recurso controla a formação de gotículas e sua transferência através do arco (IORDACHESCU; QUINTINO, 2008).

Por suas propriedades específicas, os processos MIG são adequados para aplicações de revestimento. De fato, estes revestimentos requerem baixa diluição e baixa penetração. Ao contrário dos processos clássicos de soldagem a arco, como o TIG, a parte principal da energia

da soldagem MIG é usada para derreter o arame de enchimento. Assim, o metal básico é menos aquecido e menos penetrado do que com o processo de soldagem com gás inerte de tungstênio (TIG) (IORDACHESCU; QUINTINO, 2008).

2.4 Soldagem de eletrodo revestido

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (do inglês Shielded Metal Arc Welding – SMAW) é a técnica de fabricação de metal mais comum na indústria devido à sua confiabilidade e capacidade de produzir soldas de boa qualidade. Durante a operação, a extremidade de metal desencapada da barra de fusão (oposta à ponta de soldagem) é presa no suporte do eletrodo que está conectado à fonte de alimentação. O suporte tem uma alça isolada para que possa ser segurado e manipulado por um soldador humano. A corrente normalmente usada nesta técnica de soldagem é 30 a 300A e tensão de 15 a 45V. A soldagem por arco de metal com eletrodo revestido geralmente é realizada manualmente. É geralmente aplicada em dutos, maquinários, estruturas, construções navais e trabalhos de reparo (SCHWEMMER; OLSON; WILLIAMSON, 1979).

Segundo Esab (2021, p. 1):

“calor produzido pelo arco elétrico é suficiente para fundir o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação” (ESAB, 2021, p. 1).

Este processo é ilustrado pela Figura 3.

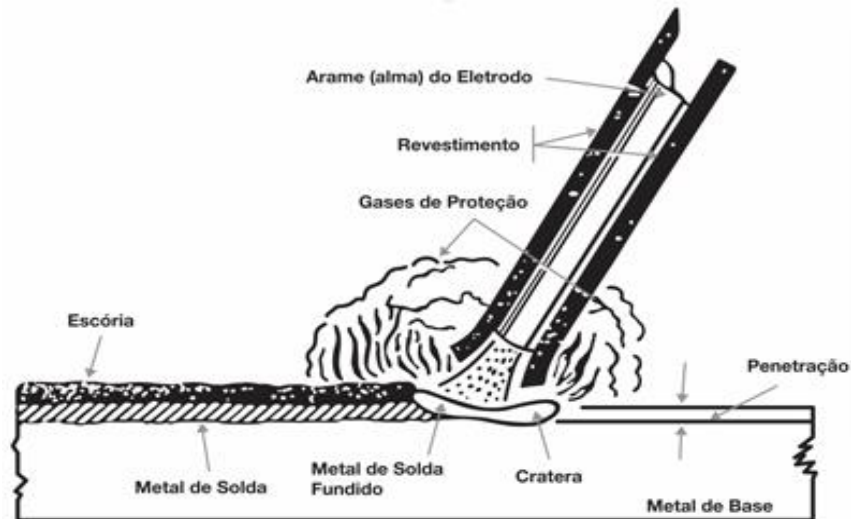


Figura 3 - Processo de soldagem com eletrodo revestido

Fonte: Esab (2021)

A desvantagem da soldagem de eletrodo revestido como uma operação de produção é o uso do eletrodo consumível. À medida que os eletrodos vão se esgotando, eles devem ser trocados periodicamente, reduzindo o tempo de arco com este processo de soldagem. Outra limitação é o nível atual que pode ser usado. Porque o comprimento do eletrodo varia durante a operação e este comprimento afeta o aquecimento da resistência do eletrodo, o nível de corrente deve ser mantido dentro de uma faixa segura ou o revestimento superaquecerá e derreterá prematuramente ao utilizar um novo eletrodo de soldagem (SCHWEMMER; OLSON; WILLIAMSON, 1979).

2.5 Custos

A pesquisa sobre a otimização da tecnologia de soldagem de diferentes tipos de solda tem sido realizada por diversos pesquisadores, utilizando uma ampla gama de materiais. Eles fazem uso de vários tipos de métodos, técnicas e modelos matemáticos para avaliar e obter resultados (EL-KASSAS; SABRY, 2017).

É essencial saber o custo de uma solda para tomar decisões de fabricação. Uma compreensão da economia e dos custos de soldagem e do valor agregado pela tecnologia permite que uma empresa os gerencie e se torne mais lucrativa. Os custos totais de soldagem devem incluir: tempo gasto na preparação de uma junta, desbaste, remoção de óleos, montagem, pré-aquecimento, posicionamento, soldagem, remoção de escória, remoção de respingos, inspeção, troca de eletrodos, tempo de transporte, tempo de configuração da máquina, reparo e

retrabalho. Os custos de material incluem: eletrodos, mistura de gás/gás de proteção, energia elétrica e gás para pré-aquecimento (EL-KASSAS; SABRY, 2017).

Segundo El-Kassas e Sabry (2017), não há mistério na estimativa de custos de soldagem. Mas deve ser apreciado que a contabilização correta do custo total de soldagem incorrido em uma operação de soldagem é um requisito preliminar para a avaliação das melhores práticas e das ferramentas necessárias para a gestão econômica de qualquer empresa de soldagem.

Um bom modelo de estimativa de custos tem influência direta na seleção do material e no tipo de processo de fabricação. Um bom modelo de custo também precisa lidar com os problemas de superestimação e subestimação. O método de redução de custos requer informações detalhadas sobre o processo de produção para derivar os componentes de custo relevantes. Mão de obra, despesas gerais, ferramentas, manutenção e reparo, entre outros, são os componentes de custo comumente usados para desenvolver modelos de custo para qualquer processo de manufatura (TIPAJI; ALLADA; MISHRA, 2007).

Patel (2013) avaliou os parâmetros corrente de soldagem, diâmetro do arame e taxa de alimentação do arame para investigar sua influência na dureza do cordão de solda para soldagem MIG e soldagem TIG pelo método de Taguchi e Análise Relacional de Gray (GRA). Do estudo, concluiu-se que a corrente de soldagem foi o parâmetro mais significativo para a soldagem MIG e TIG. Com o uso da técnica de otimização GRA, a combinação de parâmetros ideal foi encontrada sendo 100 A de corrente de soldagem, diâmetro do arame de 1,2 mm e taxa de alimentação do arame de 3 m/min para soldagem MIG.

3 METODOLOGIA

Segundo Gil (2002), a pesquisa experimental é metodologia de pesquisa de maior prestígio na ciência. A metodologia resume-se principalmente na determinação de um objeto de pesquisa, na seleção de variáveis que podem afetá-lo e na definição da forma de controlar e observar o impacto das variáveis no objeto. Portanto, neste estudo, o pesquisador é um agente ativo ao invés de um observador passivo.

Dessa maneira, o estudo seguiu-se inicialmente com a fabricação dos corpos de prova utilizando os três métodos de soldagem, avaliou-se os custos envolvidos em cada técnica e testou-se os corpos de prova com ensaios de tração, dureza e análise metalográfica, a fim de avaliar-se suas características mecânicas.

3.1 Método experimental

Com o objetivo de se determinar qual o processo de soldagem mais viável economicamente, realizou-se cada um dos três processos de solda em 10 corpos de prova diferentes a fim de se homogeneizar as variâncias estatísticas presentes nos experimentos, totalizando 30 corpos de prova (NOGUEIRA; PEREIRA, 2013) a quantidade de corpos de prova a serem ensaiados é recomendada um mínimo de cinco para haver obtenção de resultados mais confiáveis, porém o ideal é que o número de corpos de prova seja maior que 10(FREDEL, Márcio C). O processo de soldagem está ilustrado na Figura 4, e os corpos de prova na Figura 5.

Figura 4 - Processo de soldagem MIG de um dos corpos de prova a serem analisados.



Fonte: O próprio autor

Figura 5 - Corpos de prova numerados e identificados quanto ao tipo de processo de soldagem empregado.



Legenda – CP: Corpo de Prova; ER: Eletrodo Revestido; MIG: Gás inerte de metal

Fonte: O próprio autor

Para o cálculo do custo de cada processo de solda, foram levados em consideração os custos de cada consumível, listados na Tabela 3, e o tempo para a solda, levando em consideração o valor da hora do profissional empregado para a tarefa.

Tabela 3 – Consumíveis utilizados para cada técnica de soldagem

	MIG	TIG	Eletrodo Revestido
Consumíveis	Gás Star Gold, arame de solda 70S3 de 1,0 mm	Gás de Argônio e vareta de solda 70S3 de 2,5 mm	Eletrodo 7018 de 2,5 mm da marca Esab

Ademais, realizaram-se ensaios de dureza e tração em um dos corpos de prova, segundo a norma ASME Seção IX Edição 2019, a fim de determinar as características do aço após cada método de solda. Os corpos de prova foram cortados em um tamanho conforme preconiza a NBR 6152, esse tamanho é de 100x100 mm. No ensaio de tração, submete-se um corpo de prova a um esforço, que tende a alongá-lo ou até mesmo esticá-lo até a sua ruptura. Os esforços ou cargas aplicadas ao mesmo são medidas na própria máquina de ensaio. Geralmente, este ensaio é realizado utilizando-se um corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados, ou, dependendo da finalidade do ensaio, suas informações possam ser usadas tecnicamente (FREDEL, Márcio C). Já no teste de dureza o corpo de prova é submetido a uma deformação local, como por exemplo um risco. O microdurômetro e a máquina de tração utilizadas podem ser observadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Com estes dados, avaliou-se qual o processo de solda mais viável economicamente.

Figura 6 - Microdurômetro utilizado nos ensaios de dureza.



Fonte: O próprio autor

Figura 7 - Máquina de ensaio de tração utilizada na pesquisa.



Fonte: O próprio autor

3.2 Análise do custo de soldagem

Para avaliação do tempo de soldagem, foi cronometrada a soldagem dos 30 corpos de prova. Considerou-se o tempo decorrido desde o momento em que o profissional começava o cordão de solda até a finalização do procedimento. Anotou-se os tempos e posteriormente calculou-se a média de tempo necessário para realizar cada um dos processos de solda. Os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA ($\alpha = 5\%$), com o auxílio do software *Excel*, a fim de testar-se a diferença estatisticamente significativa entre os métodos de soldagem. A ANOVA é uma técnica estatística ou um procedimento utilizado para fazer comparações entre três ou mais grupos em amostras independentes. Assim, torna-se possível fazer afirmações sobre as médias das populações baseado na análise de variâncias amostrais (MARTINS, 2008).

Utilizou-se uma balança para medir a quantidade de eletrodo consumível, arame de soldagem MIG e vareta de soldagem TIG utilizados no processo de soldagem. Para levantamento das quantidades de gases gastos no processo, utilizou-se um manômetro para aferição da variação do volume de gás.

Com as variáveis tempo de soldagem e quantidade de insumos gastos para realizar o processo, utilizou-se a Equação 1 para calcular o custo

$$C_{Total} = T_s * C_s + M_{cons} * C_{cons} + V_{gás} * C_{gás} \quad (1)$$

, onde C_{Total} é o custo total do processo de solda, T_s é o tempo necessário para o processo de solda, C_s é o custo por tempo do profissional soldador, M_{cons} é a massa de consumível utilizado, C_{cons} é o custo por kg do consumível, $V_{gás}$ é o volume de gás utilizado e $C_{gás}$ é o custo por volume do gás.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão dispostos os dados obtidos através do processo de soldagem e dos ensaios de tração realizados.

4.1 Dados coletados durante o processo de soldagem

Os dados de tempo coletados estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de tempo, em minutos, para cada processo de solda

Tempos	MIG [min]	TIG [min]	Eletrodo Revestido [min]
T1	1,42	7,55	5,05
T2	1,37	7,35	5,24
T3	1,43	6,29	4,51
T4	2,02	6,45	5,15
T5	1,52	4,26	5,04
T6	1,57	4,3	6,31
T7	1,43	4,34	6,02
T8	1,56	4,57	4,5
T9	1,49	4,15	4,39
T10	1,41	5,15	5,12
Média	1,52	5,44	5,13

Fonte: O próprio autor

Com isso, observou-se que o processo MIG é o mais rápido entre os três métodos de soldagem. Utilizando o teste ANOVA com $\alpha = 5\%$, avaliou-se que a técnica com eletrodo revestido não é mais rápida que a técnica TIG ($p > 0,5$), atribuindo-se ao acaso a menor média de tempo do eletrodo revestido.

As quantidades dos eletrodos e gases consumíveis gastos estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantias de eletrodos (kg) e gases (m³) consumíveis utilizados no processo de solda de cada corpo de prova

CP	MIG		TIG		Eletrodo Revestido	
	Eletrodo	Gás	Eletrodo	Gás	Eletrodo	Gás
1	0,42	0,10	0,72	0,20	0,90	0,00
2	0,38	0,13	0,78	0,21	0,70	0,00
3	0,35	0,15	0,65	0,22	0,84	0,00
4	0,37	0,16	0,87	0,23	0,87	0,00
5	0,45	0,18	0,75	0,17	1,08	0,00
6	0,48	0,12	0,68	0,16	1,00	0,00
7	0,49	0,11	0,79	0,17	0,81	0,00
8	0,45	0,10	0,75	0,17	1,08	0,00
9	0,42	0,09	0,72	0,18	0,92	0,00
10	0,38	0,08	0,68	0,19	0,88	0,00
Média	0,42	0,12	0,74	0,19	0,91	0,00

Fonte: O próprio autor

Estes resultados corroboram com os reportados por Reed (2016), que afirmou que a técnica MIG é mais rápida do que a TIG e, portanto, utiliza menos insumos no processo.

A Tabela 6 traz os custos de cada consumível utilizado nos processos de soldagem.

Tabela 6 - Custo dos consumíveis utilizados em cada processo de soldagem. Custo dos eletrodos expressos por kg, dos gases por metro cúbico e do profissional soldador por hora.

Processo	Tipo	Custos [R\$]
MIG	Eletrodo	21,5
	Gás	24
	Soldador	12,72
TIG	Eletrodo	35,3
	Gás	24
	Soldador	14,54
Eletrodo Revestido	Eletrodo	29,9
	Gás	-
	Soldador	10,1

Fonte: O próprio autor

Com os dados da Tabela 4, 5 e 6, seguiu-se com o cálculo dos custos segundo a Equação 1, cujo resultado está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Custo total médio de cada processo de soldagem

	MIG	TIG	Eletrodo Revestido
Custo total	R\$12,25	R\$31,95	R\$28,01

Fonte: O próprio autor

Assim, de acordo com os dados obtidos durante o processo de soldagem, identificou-se que o processo MIG é o processo com menor custo total, seguido da técnica com Eletrodo Revestido e finalmente a técnica TIG. O processo MIG demonstrou ser o mais rápido, com média de 1,52 min/peça, o que utiliza a menor quantidade de eletrodo, 0,42 kg/peça, e o que utiliza menos gás, 0,12m³/peça.

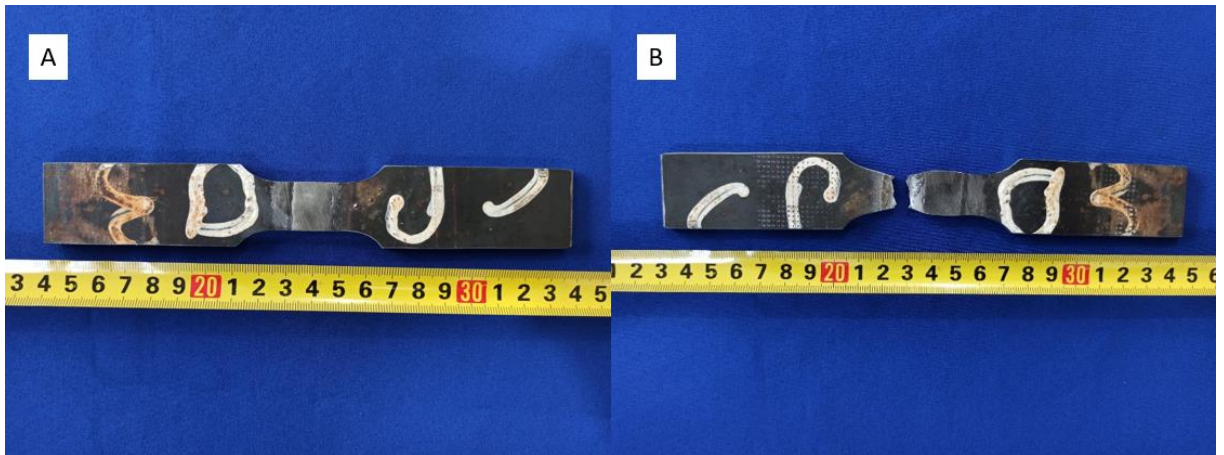
4.2 Dados coletados através dos ensaios

Depois de se obter e analisar os dados obtidos durante o processo de soldagem, seguiu-se com os ensaios de dureza e tração dos corpos de prova. Também foram realizadas análises metalográficas e macrográficas dos corpos de prova, que foram pré-tratadas com solução Nital 3%, para limpeza.

4.2.1 Eletrodo Revestido

No ensaio de tração, o corpo de prova soldado com eletrodo revestido se rompeu com força de 3893 kgf e limite de resistência 445 MPa, com fratura no metal base (Figura 8). O limite de resistência está de acordo com o que preconiza a norma ASTM para o aço A36, que traz que este limite deve estar entre 400 a 550 MPa.

Figura 8 - Corpo de prova soldado com eletrodo revestido antes (A) e depois (B) do ensaio de tração

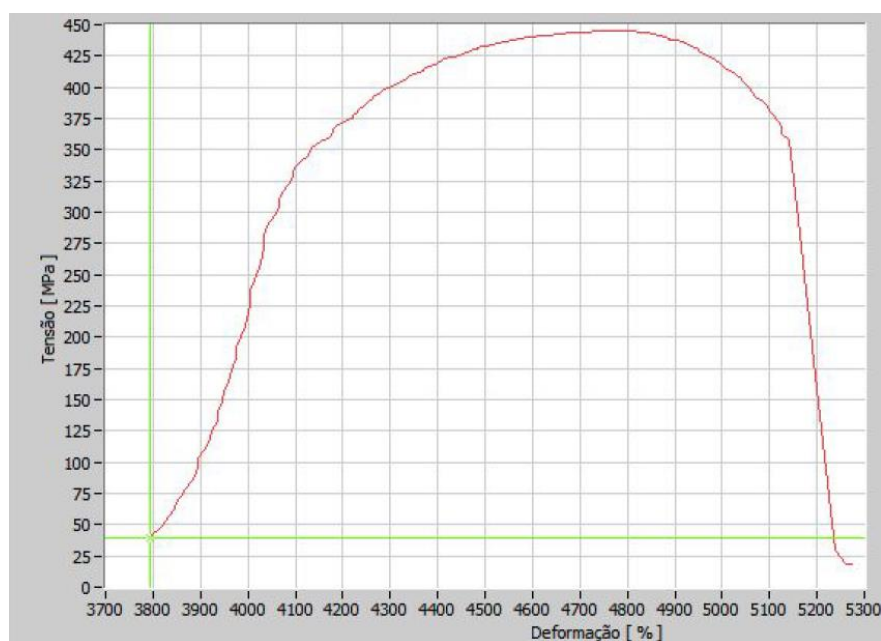


Fonte: O próprio autor

Na Figura 8a podem se caracterizar o corpo de prova soldado com eletrodo revestido antes de ser submetido a ao ensaio de tração, e a Figura 8b pode se notar o corpo de prova rompido, logo após ser sujeito a tração.

A Figura 9 mostra o gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração. Assim, percebe-se que o corpo de prova apresentou estado de deformação pós-crítica com uma carga de 445 MPa.

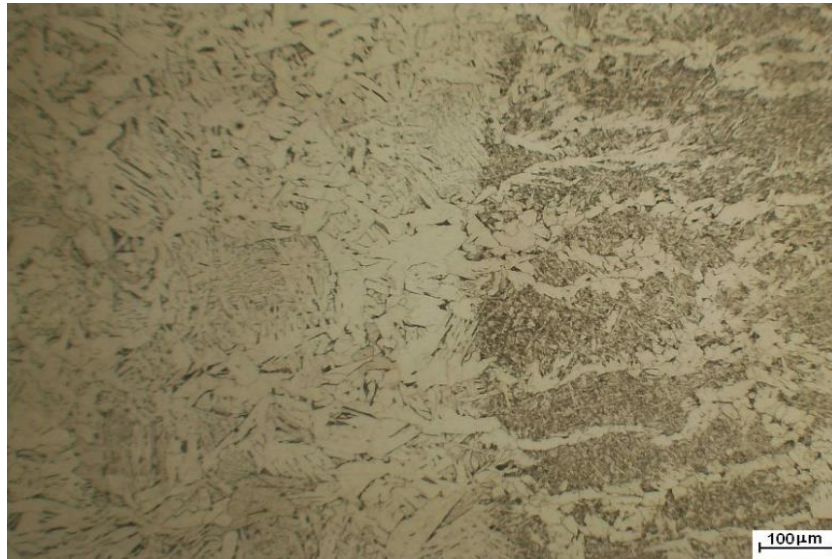
Figura 9 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido



Fonte: O próprio autor

A Figura 10 mostra a análise metalográfica do corpo de prova no local de transição da solda com o metal base (ZTA), onde é possível analisar a matriz ferrítica, parte mais clara do metal. A parte mais escura é caracterizada como bainita, um microconstituente tipicamente formado nos aços tratados termicamente.

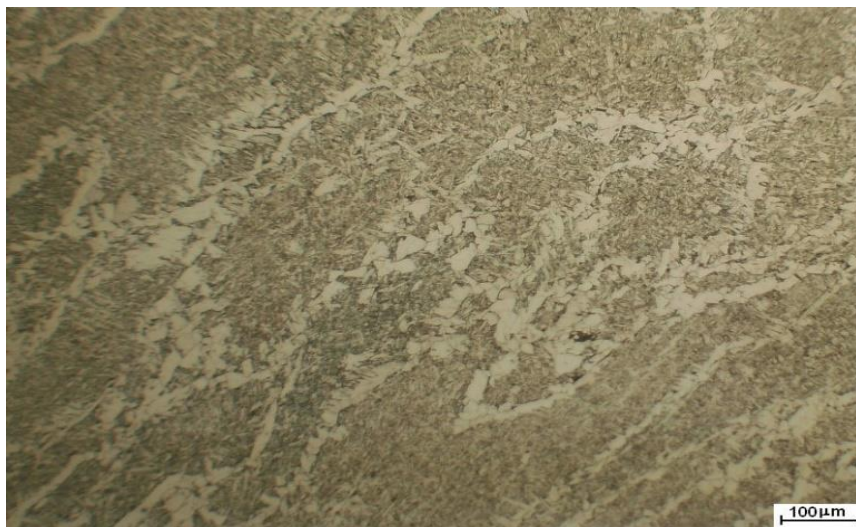
Figura 10 - Metalografia da ZTA do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido.



Fonte: O próprio autor

A Figura 11 mostra a metalografia do local de solda, onde observa-se matriz bainítica, parte mais escura, com presença de ferrita em volta de grãos colunares, parte mais clara.

Figura 11 - Metalografia do local de solda do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido.



Fonte: O próprio autor

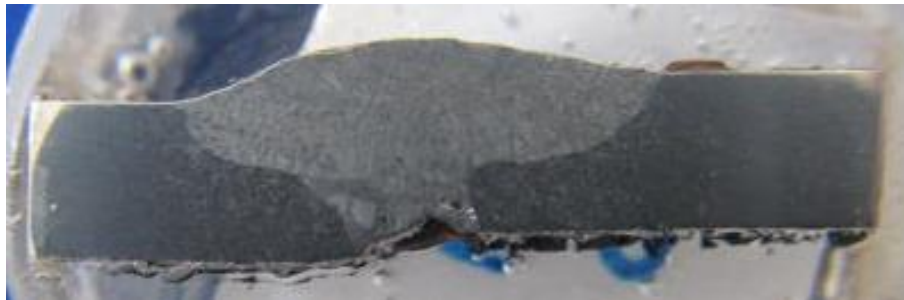
A análise de dureza foi realizada em três diferentes locais do corpo de prova, a fim de se ter um melhor resultado. Ela foi realizada no metal base, na solda e na ZTA. Os resultados estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Ensaio de dureza do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido

Microdureza (Vickers 1,0 kgf)			
Pontos	Metal Base	Solda	ZTA
1	103	185	133
2	105	199	129
3	110	197	119
Média	106	194	127

Na análise macrográfica, ilustrada pela Figura 12, pode-se observar que a região da raiz apresentou descontinuidade como falta de penetração.

Figura 12 - Análise macrográfica do corpo de prova soldado por Eletrodo Revestido

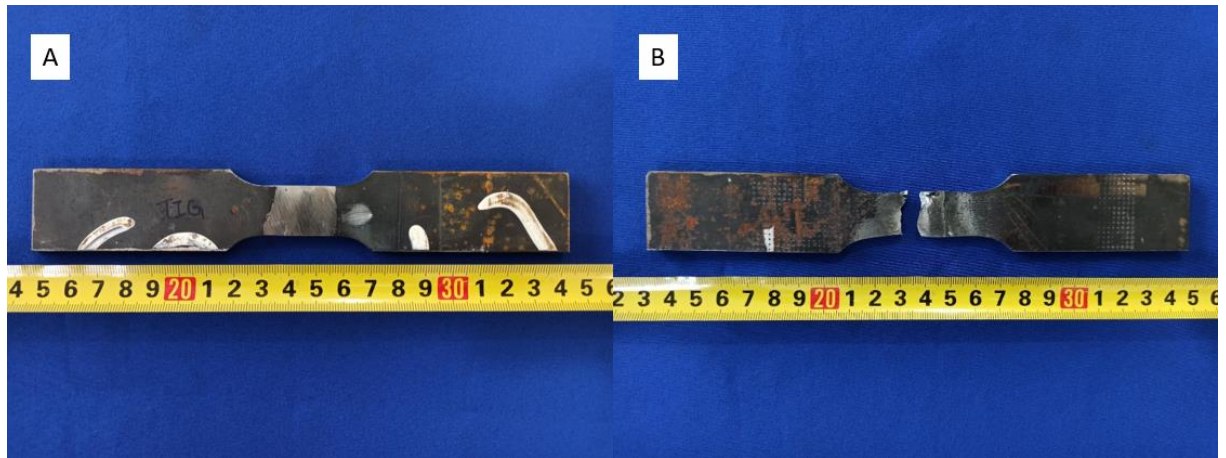


Fonte: O próprio autor

4.2.2 TIG

No ensaio de tração, o corpo de prova soldado com TIG se rompeu com força de 3752 kgf e limite de resistência 419 MPa, com fratura na solda (Figura 14).

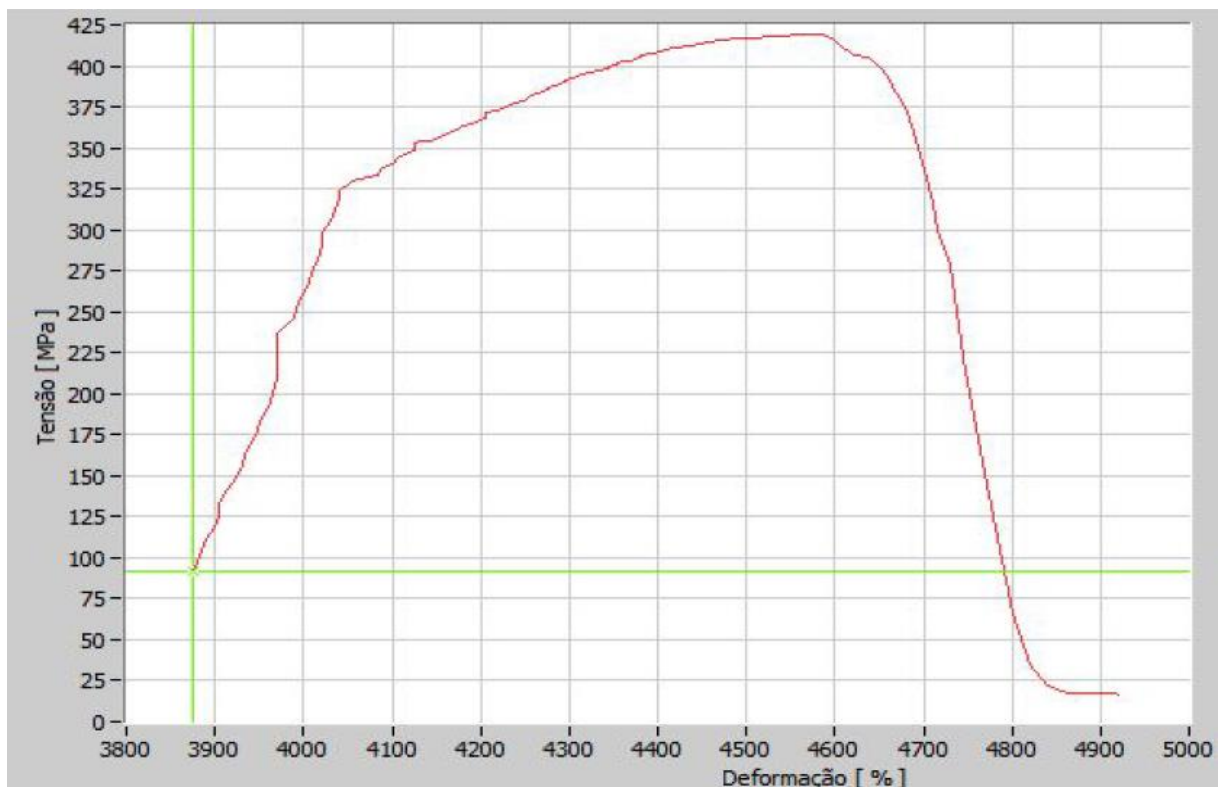
Figura 13 - Corpo de prova soldado via processo TIG antes (A) e depois (B) do ensaio de tração



Fonte: O próprio autor

A Figura 14 mostra o gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração. Percebe-se então que o limite de resistência é de 419 MPa, onde o estágio de deformação pós-crítica se tomou e houve rápido rompimento do corpo de prova.

Figura 14 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração do corpo de prova soldado via processo TIG



Fonte: O próprio autor

A Figura 15 mostra a análise metalográfica do corpo de prova no local de transição da solda com o metal base (ZTA), onde é possível analisar a matriz ferrítica, parte mais escura do metal.

Figura 15 - Metalografia da ZTA do corpo de prova soldado via processo TIG.



Fonte: O próprio autor

A Figura 16 mostra a análise metalográfica do metal base, com matriz ferrítica e presença de perlita fina. Grãos ferríticos predominantes e microestrutura típica de aço baixo carbono, laminado a quente.

Figura 16 - Metalografia do metal base do corpo de prova soldado via processo TIG.



Fonte: O próprio autor

A Figura 17 mostra a metalografia do local de solda, onde observa-se matriz bainítica em início de decomposição com presença de ferrita distribuída em grãos colunares que são presentes nas figuras, como essa formação mais grosseira, que é típica de uma solda que foi produzida sem um tratamento térmico.

Figura 17 - Metalografia do local de solda do corpo de prova soldado via processo TIG.



Fonte: O próprio autor

A análise de dureza foi realizada três vezes em cada um dos três pontos do corpo de prova: no metal base, na solda e na ZTA. Os resultados estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Ensaio de dureza do corpo de prova soldado via processo TIG.

Microdureza (Vickers 1,0 kgf)			
Pontos	Metal Base	Solda	ZTA
1	110	189	136
2	119	175	127
3	117	185	127
Média	115	183	130

Na análise macrográfica, ilustrada pela Figura 20, pode-se observar que houve deposição completa e boa penetração no passe de raiz.

Figura 18 - Análise macrográfica do corpo de prova soldado via processo TIG.

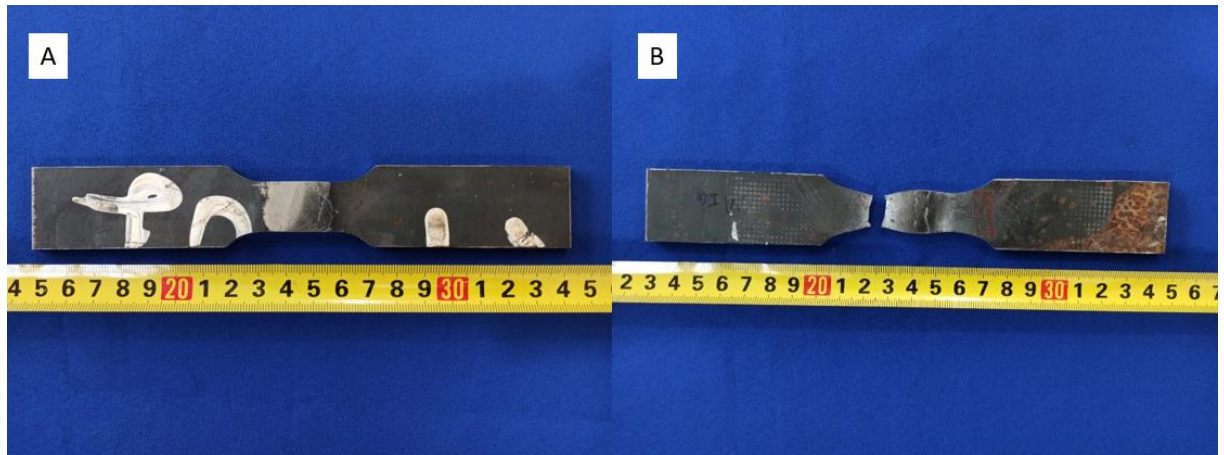


Fonte: O próprio autor

4.2.3 MIG

No ensaio de tração, o corpo de prova soldado via processo MIG se rompeu com força de 3892 kgf e limite de resistência 443 MPa, com fratura no metal base (Figura 20).

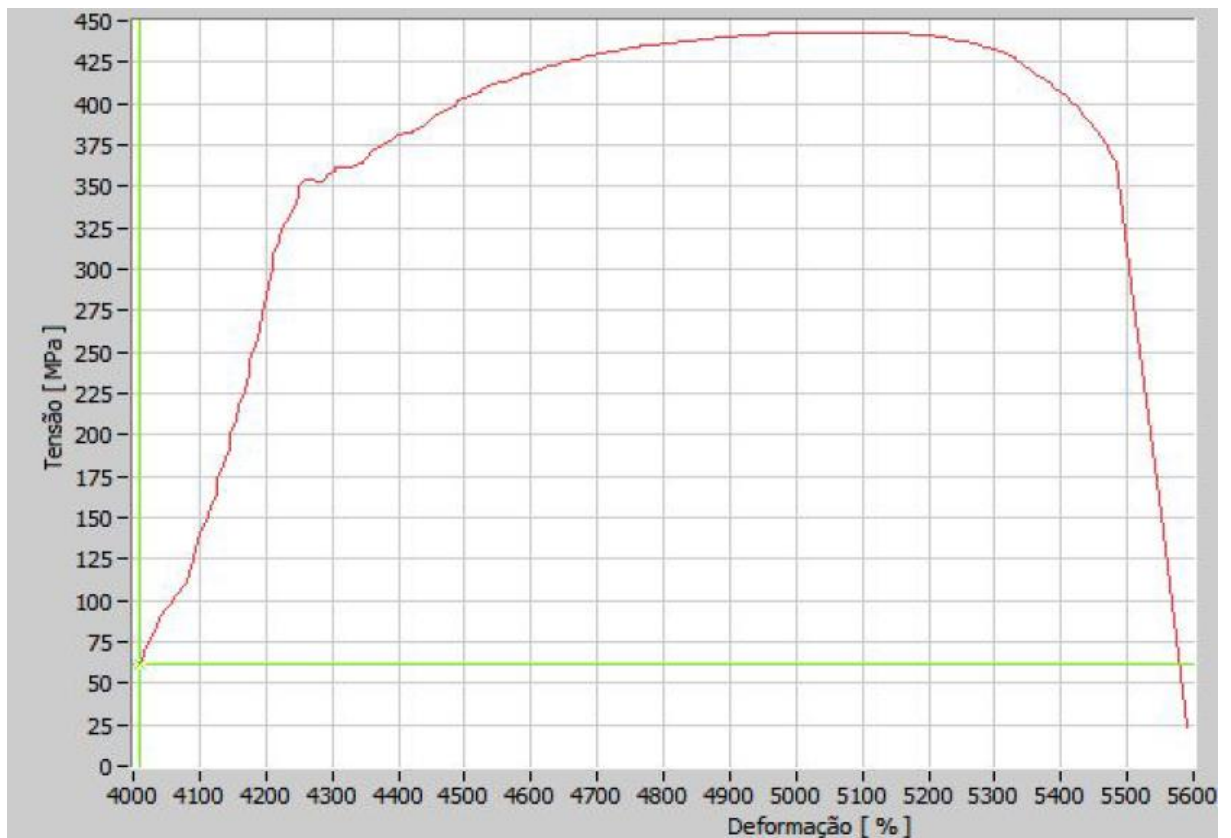
Figura 19 - Corpo de prova soldado via processo MIG antes (A) e depois (B) do ensaio de tração.



Fonte: O próprio autor

A Figura 20 mostra o gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração (inserir o limite de resistência no texto).

Figura 20 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração do corpo de prova soldado via processo MIG.



Fonte: O próprio autor

A Figura 20 mostra a análise metalográfica do corpo de prova no local de transição da solda com o metal base (ZTA), onde é possível observar grãos colunares de ferrita e bainita em início de decomposição.

Figura 21 - Metalografia da ZTA do corpo de prova soldado via processo MIG.



Fonte: O próprio autor

A Figura 22 mostra a análise metalográfica do metal base, com matriz ferrítica e presença de perlita fina. Grãos ferríticos predominantes e microestrutura típica de aço baixo carbono, laminado a quente.

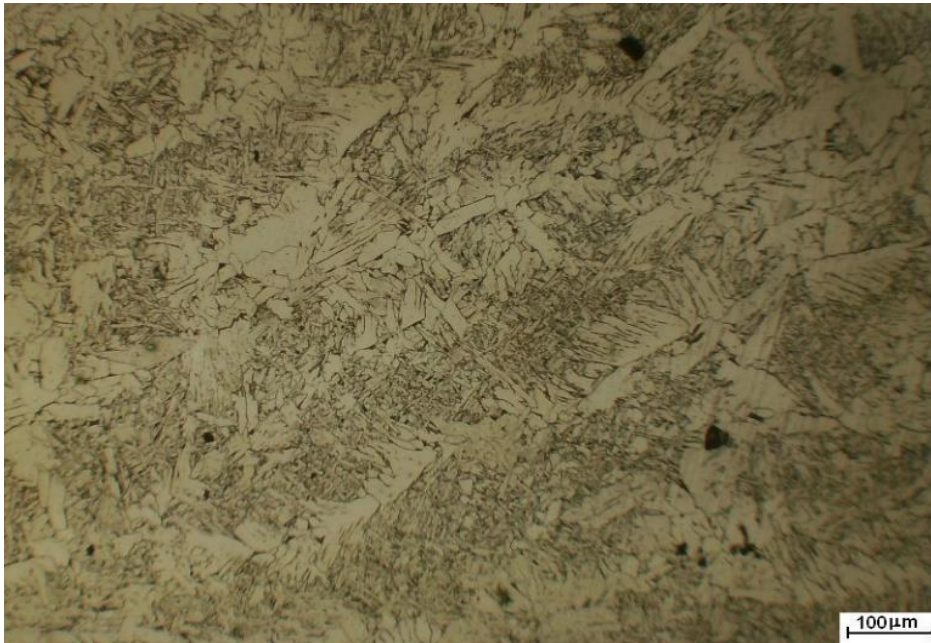
Figura 22 - Metalografia do metal base do corpo de prova soldado via processo MIG.



Fonte: O próprio autor

A Figura 23 mostra a metalografia do local de solda, onde observa-se matriz bainita em início de decomposição com presença de ferrita distribuída em grãos colunares.

Figura 23 - Metalografia do local de solda do corpo de prova soldado via processo MIG.



Fonte: O próprio autor

A análise de dureza foi realizada por três vezes em três pontos do corpo de prova: no metal base, na solda e na ZTA. Os resultados estão na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio de dureza do corpo de prova soldado via processo MIG.

Microdureza (Vickers 1,0 kgf)			
Pontos	Metal Base	Solda	ZTA
1	121	219	165
2	125	189	156
3	125	193	148
Média	124	200	156

Fonte: O próprio autor

Na análise macrográfica, ilustrada pela Figura 24, pode-se observar que houve deposição completa e boa penetração no passe de raiz.

Figura 24 - Análise macrográfica do corpo de prova soldado via processo MIG



Fonte: O próprio autor

Assim, observou-se que, além do menor custo dentre os três processos de soldagem, o processo MIG também apresentou a maior dureza entre os três processos e limite de resistência similar ao do processo TIG.

4.3 Comparação dos métodos de soldagem

Por fim, a Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelas análises realizadas no presente trabalho.

Tabela 11 – Resultados dos parâmetros avaliados no trabalho para os três métodos de soldagem.

Parâmetro	MIG	TIG	Eletrodo Revestido
Tempo [min]	1,52	5,44	5,13
Custo [R\$]	12,25	31,95	28,01
Limite de resistência [MPa]	443	419	445
Dureza na Solda [Vickers]	200	183	194
Local da fratura	Metal base	Solda	Metal base

Fonte: O próprio autor

5 CONCLUSÃO

Diante do amplo leque de técnicas de soldagem atuais, faz-se necessário entender quais as vantagens e desvantagens de cada uma, principalmente do ponto de vista econômico. Dentre as técnicas mais utilizadas estão as soldagens via MIG, TIG e eletrodo revestido, escolhidas como objeto de pesquisa do presente trabalho. Assim, pretendeu-se, através da coleta de dados durante o processo de solda e ensaios dos corpos de prova fabricados, avaliar qual técnica de solda seria a mais economicamente viável e quais as diferenças mecânicas dos corpos de prova, em suma o trabalho irá facilitar pesquisas futuras quando se deparar com casos semelhantes, além de trazer variáveis diferentes além do custo, como limite de resistência e tensão até a ruptura, que na área metalúrgica deve ser sempre levada em consideração.

Considerando-se a quantidade de consumíveis requeridos por cada processo, bem como seus custos e tempo dispensado pelo profissional soldador, concluiu-se que o processo MIG foi o mais economicamente viável, apresentando 38,4% do custo do processo TIG e 43,7% do processo com Eletrodo Revestido. Também, o corpo de prova fabricado com a solda MIG apresentou a maior dureza dentre os três processos e um limite de resistência similar ao do processo TIG.

Para pesquisas futuras, sugere-se aumentar o número de amostras ensaiadas nos equipamentos de tração e dureza, a fim de homogeneizar-se as variâncias estatísticas possivelmente encontradas nos testes. Também, pode-se aprofundar o estudo das características de corpos de prova soldados em mais de uma geometria, além da plana.

Com isso, espera-se, através da revisão da literatura e dos resultados apresentados, ter esclarecido as vantagens e desvantagens de cada tipo de solda, bem como os aspectos econômicos e características físicas dos corpos de prova produzidos através destes, atingindo os objetivos propostos no presente estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6152. **Materiais Metálicos: Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente**. Rio de Janeiro, 2002.

ALLGAYER, Alexandre André. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas de uma junta de aço ASTM A36 soldado pelo processo de arco submerso (SAW) com diferentes aportes térmicos**. 2017. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.

ATMA, R. M. R.; VARGHESE, J. Determination of Distortion Developed During TIG welding of low carbon steel plate. **International Journal of Engineering Research and General Science**, [s. l.], v. 2, n. 5, 2014. Available at: www.ijergs.org. Acesso em: 23 jun. 2021.

BU, Y.; GARDNER, L. Finite element modelling and design of welded stainless steel I-section columns. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 152, p. 57–67, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.026>

DAVIS, J. R. **Corrosion of Weldments Edited by J. Davis**. [S. l.: s. n.], 2006. ISSN 0009-4978.

EL-KASSAS, A. M.; SABRY, I. **A Comparison between FSW, MIG and TIG based on Total Cost Estimation for Aluminum Pipes** *European Journal of Advances in Engineering and Technology*. [S. l.: s. n.], 2017.

ESAB. **Processo de Soldagem**: eletrodo revestido (MMA/SMAW). Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_smaw.cfm. Acesso em: 21 jun. 2021.

FREDEL, Márcio C. *et al.* **Propriedades Mecânicas: ensaios fundamentais**. Santa Catarina: Celmat, 2015. 145 p.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisas**. 4 ed. São Paulo: Atlas 2002.

HOWE, P.; KELLEY, S. C. A comparison of the resistance spot weldability of bare, hot-dipped, galvanized, and electrogalvanized DQSK sheet steels. *In:* , 1988. **SAE Technical Papers**. [S. l.: s. n.], 1988. Available at: <https://doi.org/10.4271/880280>

HUSSAIN, A. K.; LATEEF, A.; JAVED, M. **Influence of Welding Speed on Tensile Strength of Welded Joint in TIG Welding Process** *International Journal of Applied Engineering Research*. [S. l.: s. n.], 2010.

IORDACHESCU, D.; QUINTINO, L. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 202, n. 1–3, p. 391–397, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.081>

KANG, B. Y. *et al.* The effect of alternate supply of shielding gases in austenite stainless steel GTA welding. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 10, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.035>

KUMAR, A.; SUNDARRAJAN, S. Effect of welding parameters on mechanical properties and optimization of pulsed TIG welding of Al-Mg-Si alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 42, n. 1–2, p. 118–125, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1572-8>

KUMAR, Ajay; MILTON, M. S. A Comparison of Welding Techniques of Aluminium Alloys A Literature Review. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET)**, [s. l.], v. 2, n. 3, 2016.

KUMAR, S.; SHAHI, A. S. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. **Materials and Design**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 3617–3623, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.017>

MARTINS, Danilo Gomes. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia - GO**. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

MODENESI, Paulo J. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. 2008. Universidade Federal de Minas Gerais Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/terminologia.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

MURTY, K. L. *et al.* Nondestructive determination of tensile properties and fracture toughness of cold worked A36 steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, [s. l.], v. 75, n. 11, p. 831–840, 1998. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00093-3). Acesso em: 23 jun. 2021.

NOGUEIRA, D. A.; PEREIRA, G. M. Desempenho de testes para homogeneidade de variâncias em delineamentos inteiramente casualizados. **Sigmae**, [s. l.], v. 2, n. 1, 2013.

RAMAKRISHNAN, P. Welding Metallurgy. **Indian Welding Journal**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 89, 1972. Available at: <https://doi.org/10.22486/iwj.v4i3.150243>

REED, Brian. **MIG vs TIG welding: the difference explained**. 2016. Disponível em: <https://www.fairlawntool.com/blog/mig-vs-tig-welding/>. Acesso em: 21 nov. 2021.

SANTIAGO, A. kokke; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. de. **Manual de Construção em Aço Steel Framing: Arquitetura**. [S. l.: s. n.], 2012. v. 4

SASTRY, C. C. *et al.* Experimental investigation on boring of HSLA ASTM A36 steel under dry, wet, and cryogenic environments. **Materials and Manufacturing Processes**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 1352–1379, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1643477>. Acesso em: 23 jun. 2021.

SCHWEDERSKY, M. B. *et al.* Soldagem TIG de elevada produtividade: influência dos gases de proteção na velocidade limite para formação de defeitos. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 16, n. 4, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1590/s0104-92242011000400004>

SCHWEMMER, D. D.; OLSON, D. L.; WILLIAMSON, D. L. Relationship of weld penetration to the welding flux. **Weld J (Miami Fla)**, [s. l.], v. 58, n. 5, 1979.

SEN, R. *et al.* A comprehensive review on the feasibility study of metal inert gas welding. *In:* , 2018. **Materials Today: Proceedings**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018. p. 17792–17801. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.104>

SEO, D. W.; JEON, Y. B.; LIM, J. K. Effect of electric weld current on spatter reduction in spot welding process. *In:* , 2004. **Key Engineering Materials**. [S. l.: s. n.], 2004. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.261-263.1623>

TANAKA, M. *et al.* Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 397–402, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1179/136217100101538461>

TARNG, Y. S.; YANG, W. H. Optimisation of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the taguchi method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 549–554, 1998. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF01301698>. Acesso em: 23 jun. 2021.

TEWARI, S. P.; GUPTA, A.; PRAKASH, J. Effect of Welding Parameters on the Weldability of Material. **International Journal of Engineering Science and Technology**, [s. l.], v. 2, n. 4, 2010.

TIPAJI, P. K.; ALLADA, V.; MISHRA, R. A Cost Model for the Metal Inert Gas (MIG) Welding Process. *In:* , 2007. **Volume 4: ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications and the 19th Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention Conference**. [S. l.]: ASMEDC, 2007. p. 751–760. Available at: <https://doi.org/10.1115/DETC2007-35795>

WILDEMANN, V. E.; LOMAKIN, E. V.; TRETYAKOV, M. P.. Postcritical deformation of steels in plane stress state. **Mechanics Of Solids**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 18-26, jan. 2014. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s0025654414010038>.

YURI, T. *et al.* Effect of welding structure and δ -ferrite on fatigue properties for TIG welded austenitic stainless steels at cryogenic temperatures. **Cryogenics**, [s. l.], v. 40, n. 4, 2000. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(00\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(00)00033-3)