

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

LUIZ EDUARDO ZANDONÁ

**ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GTAW E GMAW
PARA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO METÁLICO APLICADO EM VÁLVULAS**

BENTO GONÇALVES

2025

LUIZ EDUARDO ZANDONÁ

**ANÁLISE COMPARATIVA DO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW E GMAW
PARA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO METÁLICO APLICADO EM VÁLVULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador:
Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

BENTO GONÇALVES

2025

LUIZ EDUARDO ZANDONÁ

**ANÁLISE COMPARATIVA DO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW E GMAW
PARA DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTO METÁLICO APLICADO EM VÁLVULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador:
Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

Aprovado em 04/07/2025

Banca Examinadora

Prof. Me. Eng. Victor Hugo Velazquez Acosta
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Eng. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul

Me. Eng. Mec. Carlos Eduardo Rheinheimer

RESUMO

O processo de soldagem na indústria é altamente utilizado por ser o principal método de união de chapas e materiais metálicos, bem como de reparo e de revestimento de componentes. Para viabilizar economicamente a fabricação de componentes para a indústria de óleo e gás, utiliza-se aço carbono fundido como metal base e executam-se revestimentos metálicos aplicados por soldagem. Um dos principais materiais utilizados como revestimento metálico é o Inconel 625, uma liga fabricada em base níquel com o intuito de melhorar propriedades como resistência ao desgaste e à corrosão por atrito, resistência ao escoamento, à fadiga e à fluência, bem como alta soldabilidade. Desta forma, o presente trabalho desenvolveu um estudo comparativo dos processos de solda GTAW e GMAW para revestimento de Inconel 625 em válvulas industriais, com o intuito de analisar a qualidade e eficiência atingidas por ambos processos de soldagem. Foram analisados os parâmetros de qualidade, por meio de ensaio químico, ensaio de dureza, ensaio de dobramento, ensaio macrográfico, ensaio micrográfico e ensaio de corrosão, de produtividade, por meio de análise do tempo e custo de aplicação, e, por fim, de versatilidade, por meio da análise da metodologia de aplicação e do gasto de consumíveis. Foi possível concluir que o processo GMAW apresenta melhor desempenho na análise de qualidade, versatilidade e produtividade, comparado ao processo GTAW.

Palavras-chave: soldagem, GTAW, GMAW, Inconel 625, qualidade de solda, versatilidade de solda, produtividade de solda.

ABSTRACT

Welding is extensively employed in the industrial sector as the primary method for joining metal sheets and components, as well as for repair and surface cladding applications. To ensure the cost-effective manufacturing of components for the oil and gas industry, cast carbon steel is commonly used as the base metal, with metallic overlays applied via welding. Among the most widely used overlay materials is Inconel 625, a nickel-based alloy designed to enhance properties such as wear and friction-corrosion resistance, yield strength, fatigue and creep resistance, and weldability. This study developed a comparative analysis of the GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) and GMAW (Gas Metal Arc Welding) processes for the application of Inconel 625 overlays on industrial valves, focusing on the quality and efficiency achieved by each process. The evaluation of quality parameters included chemical composition analysis, hardness testing, bend testing, macrographic and micrographic examinations, and corrosion testing. Productivity was assessed through time and cost analysis, while versatility was evaluated based on application methodology and consumable usage. The results indicate that the GMAW process outperforms GTAW in terms of weld quality, operational versatility, and overall productivity.

Keywords: welding, GTAW, GMAW, Inconel 625, weld quality, process versatility, welding productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtos fabricados pela Micromazza.	14
Figura 2 – Apresentação esquemática da zona fundida/metal de solda (A+B) e de base (C)..	21
Figura 3 – Processo de soldagem GTAW ou TIG com metal de adição.....	23
Figura 4 – Ilustração do processo de soldagem GMAW.....	25
Figura 5 – Porosidade no cordão de solda.	32
Figura 6 – Falta de fusão na solda GTAW.	33
Figura 7 – Exemplo de mordedura.	34
Figura 8 – Fluxograma para avaliação do processo de soldagem.	38
Figura 9 – Corte dos corpos de prova.....	40
Figura 10 – Mapa dos pontos de medição.	46
Figura 11 – Resultados do ensaio de dureza Vickers para os processos de soldagem.	46
Figura 12 – Análise macrográfica.	48
Figura 13 – Energia empregada nos processos de soldagem.....	49
Figura 14 – Metalografia do Inconel 625 para o processo de solda GMAW.....	51
Figura 15 – Metalografia do Inconel 625 para o processo de solda GTAW.....	51
Figura 16 – Metalografia da região de interface para o processo GMAW.....	52
Figura 17 – Metalografia da região de interface para o processo GTAW.....	52
Figura 18 – Resultados do ensaio de corrosão (ASTM G48).....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo de materiais para revestimento por soldagem e suas respectivas aplicações.....	18
Quadro 2 – Propriedades mecânicas da liga Inconel 625.....	19
Quadro 3 – Composição química da Inconel 625.....	19
Quadro 4 – Tipo de gás utilizado para tipo de material de base.....	27
Quadro 5 – Parâmetros de soldagem.	39
Quadro 6 – Ensaio de dobramento.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química do metal base.	44
Tabela 2 – Análise de composição química Inconel 625.	44
Tabela 3 – Análise de composição química à 2,5 mm.	45
Tabela 4 – Custo dos consumíveis em relação ao consumo.	54

LISTA DE SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CE	<i>Carbono Equivalente</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HRC	<i>Dureza Rockwell-C</i>
HVOF	<i>High Velocity Oxygen Fuel</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IOGP	<i>International Association of Oil & Gas Producers</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
LBW	<i>Laser Welding Fiber</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
mm	<i>milímetros</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PTAW	<i>Plasma Transferred Arc Welding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZTA	<i>Zona Termicamente Afetada</i>
CP	<i>Corpo de Prova</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
“	Polegada
CC+	Corrente Contínua Positiva
CC-	Corrente Contínua Negativa
CA-	Corrente Alternada Negativa
CA+	Corrente Alternada Positiva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS.....	17
2.2	FABRICAÇÃO DE PEÇAS PARA ATENDER O SETOR DE PETRÓLEO E GÁS, ESPECIALMENTE VÁLVULAS	17
2.3	SOLDA DE REVESTIMENTO.....	18
2.4	INCONEL 625	19
2.5	PROCESSO DO REVESTIMENTO DAS VÁLVULAS.....	20
2.6	PROCESSO GTAW E GMAW	22
2.6.1	Processo de Soldagem GTAW	22
2.6.2	Processo de Soldagem GMAW	25
2.6.3	Variáveis que afetam a diluição no processo de soldagem GTAW	28
2.6.4	Variações no processo GMAW	30
2.6.5	Descontinuidades do processo de soldagem.....	32
2.6.6	Ensaio necessários para qualificação do processo.....	35
2.6.7	Processos futuros e tendências.....	36
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	ANÁLISE DA QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS.....	41
3.1.1	Ensaio químico	41
3.1.2	Ensaio de dureza	41
3.1.3	Ensaio de dobramento	41
3.1.4	Ensaio macrográfico	41
3.1.5	Ensaio micrográfico	42
3.1.6	Ensaio de corrosão	42
3.2	TEMPO DE OPERAÇÃO.....	43
3.3	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	43
3.4	TABULAÇÃO DOS RESULTADOS	43
4	RESULTADOS	44
4.1	QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS.....	44
4.1.1	Análise de composição química	44
4.1.2	Ensaio de microdureza Vickers	45
4.1.3	Ensaio de dobramento	47
4.1.4	Análise macrográfica.....	48

4.1.5	Análise metalográfica	50
4.1.6	Ensaio de corrosão	52
4.2	TEMPO DE OPERAÇÃO.....	53
4.3	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	53
5	CONCLUSÕES.....	55
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem na indústria é altamente utilizado por ser o principal método de união de chapas e materiais metálicos, bem como de reparo e de revestimento de componentes. Com a evolução da indústria novos métodos e materiais têm surgido para atender à demanda do mercado, como é o caso dos revestimentos metálicos para materiais que não apresentam boa resistência ao desgaste (KUMAR et al., 2021).

Alguns componentes requerem resistência à corrosão por seu uso diário em contato com fluidos corrosivos. Ocorre que a fundição do componente em materiais resistente à corrosão, que incluem os aços inoxidáveis, como o CD3MN, é um procedimento de alto custo, o que pode tornar a fabricação de tais componentes inviável economicamente. Como alternativa, visando a viabilidade econômica na fabricação, utilizam-se aço carbono fundido, como o WCB, e executam-se revestimentos metálicos aplicados por soldagem (KEJELIN, 2012).

Na microrregião de Veranópolis se localizam poucas empresas que atuam na fabricação de produtos para o ramo metalúrgico do petróleo e gás, devido às diversas exigências desse mercado, como a vasta gama de normas e parâmetros a serem atendidos para projeto e fabricação. Uma delas é a Micromazza Indústria de Válvulas, localizada em Vila Flores, a 10 km de Veranópolis.

A Micromazza é uma empresa do ramo de petróleo e gás, atuante há 30 anos. É conhecida mundialmente pela qualidade e por sua vasta gama de produtos, que incluem especialmente válvulas do tipo esfera, gaveta, globo, retenção, atuadores pneumáticos, entre outros, exemplificados na Figura 1.

A empresa possui reconhecimento internacional por meio de certificações, como American Petroleum Institute (API) 6D, API 600, API 602, normas utilizadas para fabricação para válvulas tipo esfera e gaveta, respectivamente, e também, por meio de seu Sistema de Gestão de Qualidade, pelas normas API Q1 e International Organization for Standardization (ISO) 9001, certificados por Órgão API.

Figura 1 – Produtos fabricados pela Micromazza.



Fonte: Catálogo Micromazza (2024).

Com o intuito de atender às normas internacionais, como a API e a International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), a Micromazza conta com uma ampla gama de válvulas industriais em seu catálogo, capazes de atender às mais diversas exigências, como o revestimento interno de Inconel 625 para os componentes que contenham pressão, sendo eles o corpo das válvulas, tampas, esferas e anéis porta sede de vedação, de diversas bitolas e designs.

Através da fundição, diferentes tipos de aços podem ser fabricados. Os mais comuns são os aços carbono, como o WCB, por não possuírem alta quantidade de elementos de ligas, tornando o processo mais econômico. Porém, com a necessidade de utilização das propriedades mecânicas do aço carbono, juntamente com a alta resistência ao desgaste dos aços duplex, surgiu a utilização de revestimentos metálicos, sendo utilizados nas partes da válvula que contenham pressão. Esse revestimento garante alta resistência ao desgaste para os materiais aço carbono, que passam a ser utilizados em tubulações de petróleo e outras linhas de materiais corrosivos.

Um dos materiais utilizados como revestimento metálico aos componentes fabricados em base carbono é o Inconel 625, desenvolvido pela INCO Alloys. Consiste em uma liga fabricada em base níquel, com alta resistência ao desgaste e à corrosão por atrito, também apresenta boa resistência ao escoamento, à fadiga e à fluência, bem como alta soldabilidade, características que o tornam amplamente empregado no ramo das indústrias do óleo e gás (KUMAR et al., 2021).

O revestimento metálico aplicado por diversos processos de soldagem, como Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Plasma Arc Welding (PAW) e Submerged Arc Welding (SAW), consiste na aplicação de uma camada soldada, depositada na superfície interna dos componentes sobre o metal base composto em aço carbono, deixando sua superfície resistente a corrosão (KEJELIN, 2012). Como alternativa da fundição de aços austeníticos, visando menor custo na fabricação, o revestimento metálico por Inconel 625 para aços de base carbono está cada vez mais presente no mercado da indústria dos ramos do petróleo e gás.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a evolução da indústria petroquímica, novos equipamentos e fluidos têm sido desenvolvidos. Consequentemente, novos materiais e métodos têm sido criados, com o intuito de aumentar a resistência ao desgaste dos materiais utilizados nos processos produtivos, causada principalmente pela passagem de fluidos altamente corrosivos. Para isso, novas estratégias de produção precisaram ser adotadas, como é o caso do revestimento metálico por processos de soldagem. Um exemplo de processo de soldagem que visa o aumento da resistência dos materiais é o revestimento de Inconel 625.

Na indústria, a superliga à base de níquel Inconel 625 é utilizada no corpo, tampa, esfera e outros componentes de válvula que contenham pressão, variando da bitola de 3/8" até 20", tendo em vista o tamanho necessário do item. No entanto, o processo de soldagem a ser utilizado requer um estudo aprofundado, que varia conforme o tipo da peça, do tamanho, entre outros. Sendo assim o processo de soldagem mais adequado e eficiente deve ser especificado com base em estudos e análises técnicas, e não apenas pela exigência do cliente.

Desta forma, o presente trabalho visa desenvolver um estudo comparativo dos processos de solda GTAW e GMAW para revestimento de Inconel 625 em válvulas industriais, com o intuito de atestar a qualidade e eficiência atingidas por ambos processos de soldagem, justificando-se pela importância de contribuir para a evolução dos processos industriais e dos materiais empregados, uma vez que melhorar a resistência ao desgaste, a resistência mecânica e a produtividade representam ganhos significativos para a indústria.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar os processos de soldagem GTAW e GMAW na aplicação de revestimento metálico em válvulas industriais a partir de um estudo comparativo da qualidade, da produtividade e da versatilidade dos processos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

a) Analisar as propriedades mecânicas e químicas, a dureza e a diluição do material soldado e do metal base, bem como entender a microestrutura e verificar possíveis alterações na composição química dos materiais.

b) Comparar a resistência à corrosão entre os revestimentos produzidos pelos processos de soldagem GMAW e GTAW.

c) Correlacionar a fusão do revestimento entre os diferentes processos de soldagem.

d) Verificar se há diferenças de produtividade entre os dois processos, em relação ao tempo e custo de aplicação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS

O petróleo é constituído por óleo e gás natural, oriundos da decomposição de matérias orgânicas (animais e plantas) e detritos minerais, recobertos por sedimentos enterrados no fundo de mares e lagoas (AUGUSTO, 2017). O setor de petróleo e gás corresponde a mais de 10% da formação bruta de capital fixo no Brasil (MENDES et al., 2018).

Mesmo com as restrições ambientais, estima-se que a dependência da humanidade para com esses produtos permaneça e cresça em aproximadamente 40% pelos próximos 20 anos (LIMA; SILVA, 2012). Daí a relevância desta indústria para a sociedade.

O escoamento de óleo, gás e água ocorre na indústria do petróleo desde o reservatório até as unidades de processamento (CONCEIÇÃO et al., 2015). O sistema de transporte e uso destes produtos é comumente realizado via dutos, por serem considerados o melhor meio de transporte de fluidos e gases a longas distâncias (ARAÚJO et al., 2015). Para a fabricação de dutos e demais peças necessárias para os sistemas de escoamento, deve-se ter em conta a possível degradação e corrosão de materiais, causada pelo processamento de óleos, compostos por hidrocarbonetos de grande peso molecular, que impactam significativamente no processo de corrosão (PESSOA, 2014).

2.2 FABRICAÇÃO DE PEÇAS PARA ATENDER O SETOR DE PETRÓLEO E GÁS, ESPECIALMENTE VÁLVULAS

Os custos envolvidos com procedimentos de reparo e recuperação dos equipamentos do setor de petróleo e gás natural são bastante elevados, considerando as propriedades requeridas em função da corrosão. Considerando tal necessidade, as ligas a base de níquel são conhecidas por associarem resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste e às altas temperaturas, porém a um alto custo de fabricação (PESSOA, 2014).

As válvulas tipo esfera são geralmente selecionadas para processos e serviços agressivos, como a indústria petroquímica (SOTOODEH, 2021). Usualmente se utiliza a liga Inconel 625 para revestimento interno das partes que contenham pressão das válvulas, como o corpo e a tampa, que normalmente são fabricados em aço carbono, por possuir melhor custo-benefício que a fabricação completa dos componentes nesse material. O revestimento garante o atendimento às necessidades mecânicas e químicas da indústria do petróleo e gás, e, para este

estudo, constitui-se de uma camada de Inconel 625 aplicada por soldagem (SOTOODEH, 2021).

2.3 SOLDA DE REVESTIMENTO

Na indústria de petróleo e gás, os aços mais comumente utilizados não apresentam as propriedades mecânicas requeridas para a aplicação desejada; por exemplo, são utilizados aço carbono, e dependendo da propriedade desejadas, aços inoxidáveis em sua maioria (KEJELIN, 2012). Em diversos casos, a resistência ao desgaste só é adquirida mediante a utilização de aços nobres, como os aços inoxidáveis ou os materiais produzidos na liga de níquel, e estes elevam significativamente o custo da produção.

No caso das válvulas, estas são submetidas a ambientes extremamente corrosivos, sendo indispensável que possuam a propriedade mecânica de resistência ao desgaste. Uma alternativa mais economicamente viável é a utilização de aços de menor custo, como os aços carbono, melhorando sua resistência ao desgaste com a aplicação de revestimentos metálicos na peça. Tal revestimento é geralmente aplicado por soldagem de um material que possua as propriedades mecânicas desejadas. Ou seja, neste caso, a soldagem se torna um processo de aplicação de revestimento. Com a aplicação do revestimento soldado em aços carbono é possível obter razoável resistência mecânica, boa soldabilidade nos conjuntos do projeto, usinabilidade e resistência a corrosão (SILVA et.al, 2012).

Diversos materiais são utilizados no processo de revestimento por soldagem para dar propriedades mecânicas extras aos aços carbonos (KEJELIN, 2012), conforme exemplificado no Quadro 1. Para atingir a propriedade de resistência à corrosão, comumente são utilizados materiais à base de níquel. Um exemplo dessa utilização é a superliga Inconel 625.

Quadro 1 – Comparativo de materiais para revestimento por soldagem e suas respectivas aplicações.

Material / Liga	Aplicação para o componente revestido por soldagem
AISI 309 L	Revestimento por soldagem externo para proteções atmosféricas
AISI 312, 317 L	Revestimento por soldagem de vasos de pressão Corrosão por ácido naftênico
Monel 400	Revestimento de vasos de pressão Em meio contendo HF (ácido fluorídrico)
Inconel 622 Inconel 625	Corrosão por ácido sulfúrico, baixo PH e aplicações em desgaste por corrosão
Hastelloy	Proteção em processos químicos agressivos em baixos PH
UNS S31803	Duplex e super-duplex para o revestimento de vasos de pressão

Fonte: Kejelin (2012).

2.4 INCONEL 625

Dentre os materiais utilizados para revestimentos destacam-se as superligas à base de níquel, por combinarem características mecânicas de elevada resistência em temperaturas altas e excelente resistência à oxidação. Estas superligas são destinadas à aplicação em áreas altamente corrosivas do ramo do petróleo e gás (SILVA et.al, 2012).

A superliga Inconel 625 possui combinação ideal de resistência ao escoamento, à fadiga e fluência, juntamente com boa resistência à oxidação, corrosão e desgaste por atrito em ambientes quimicamente agressivos. Os dados referentes a essas características são especificados no Quadro 2.

Além das propriedades mecânicas, a superliga Inconel 625 apresenta boa capacidade de fabricação e soldabilidade, características que a tornam a melhor escolha para aplicações petroquímicas (KUMAR et al., 2020).

Quadro 2 – Propriedades mecânicas da liga Inconel 625.

Propriedades	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza Brinell	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)
Inconel 625	827-1103	414-758	30-60	40-60	175-240	8.44	207.5

Fonte: Kumar et al., 2020.

A Inconel 625, inicialmente desenvolvida pela empresa INCO Alloys, possui capacidade de endurecimento por precipitação, que ocorre quando é submetida ao processo de tratamento térmico de recozimento por um longo período de tempo, exposta a temperaturas de 550 a 580 °C.

A superliga pode ainda ser melhorada na propriedade de resistência quando submetida aos efeitos de endurecimento em solução sólida de elementos de liga como cromo, molibdênio, nióbio e ferro (OLIVEIRA, et.al, 2019).

No Quadro 3 apresenta-se a composição química da superliga Inconel 625.

Quadro 3 – Composição química da Inconel 625.

Elemento	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Mn	Si	Ti	Al	C
%	58,0 (mín.)	20,0- 23,0	8,0- 10,0	3,15- 4,15	5,0 (máx.)	0,5 (máx.)	0,5 (máx.)	0,4 (máx.)	0,4 (máx.)	0,1 (máx.)

Fonte: ASME BPVC SECTION II – Part. C.

Nos últimos anos, a Inconel 625 está sendo amplamente aplicada nas indústrias petroquímicas, aeroespacial, química e marítima (KUMAR et al., 2020). A Inconel é obtida por meio de fundição em areia nos moldes de varetas e barras. Após o processo de fundição, os materiais fundidos passam por um processo de conformação, como a laminação a quente, e assim são convertidos em fios e tubos, sendo comercializados como consumíveis do processo de soldagem. (SHANKAR et al., 2000).

2.5 PROCESSO DO REVESTIMENTO DAS VÁLVULAS

Na indústria, o processo de solda geralmente é utilizado para união de elementos metálicos e/ou estruturas, normalmente por solda de topo, a qual necessita alta penetração do metal soldado para garantir resistência na junta soldada. A principal diferença entre o processo de solda de união e o processo de revestimento por soldagem está na geometria do cordão de solda (FERREIRA, 2020). No processo de revestimento por soldagem deseja-se uma geometria com cordão de solda com grande largura, baixos reforços, baixa penetração do material aplicado e baixos percentuais de diluição (KEJELIN, 2012).

Esse perfil geométrico é importante para garantir economia de material e de tempo, pois, aumentando a largura do cordão de solda, uma maior área da peça é coberta e o número de passes diminui. Com isso, o parâmetro de soldagem se torna um desafio no processo de revestimento para garantia da geometria desejada (KEJELIN, 2012).

A utilização do revestimento soldado para proteção contra corrosão envolve materiais dissimilares, ou seja, materiais que possuem características distintas de composição e propriedades. Pode-se destacar que a composição química na região soldada será intermediada entre a composição do metal base e do metal de adição (FERREIRA, 2020). Com as alterações dos parâmetros de soldagem, pode ocorrer a alteração da composição química do material depositado e do material base, uma vez que a potência do arco elétrico utilizado altera a capacidade de fusão do material base e soldado, o qual gera o cordão de solda (KEJELIN, 2012).

Com base nessas informações, torna-se de fundamental importância o conhecimento da diluição do processo de soldagem, a fim de estimar a composição química do metal fundido.

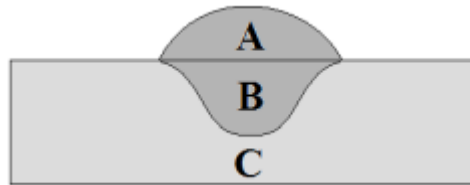
A diluição (Equação 1) pode ser definida como alteração da composição química na região de fusão da solda, causada pela junção do metal base com o consumível de solda aplicado (KEJELIN, 2012). Também pode ser caracterizada como o percentual do metal base dissolvido junto ao metal de adição, formando a composição química do metal de solda (SANTOS et.al,

2015). Pode ser determinada através de uma relação das áreas a partir do cordão de solda aplicado (Equação 1) (SANTOS et al., 2015). A Figura 2 apresenta o esquema da zona fundida, metal de solda e base.

$$D (\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} \times 100 \quad (1)$$

Apresentação esquemática da zona fundida/metal de solda (A+B) e de base (C). A região (A) compreende a parcela oriunda do metal de adição e a região (B) compreende a parcela de metal de base fundida.

Figura 2 – Apresentação esquemática da zona fundida/metal de solda (A+B) e de base (C).



Fonte: Kejelin (2012).

O controle da diluição é de total importância na soldagem de metais dissimilares, tanto quanto na deposição de revestimentos especiais sobre materiais distintos de composição química. Para manter a composição química do metal de adição e sua resistência a corrosão, valores baixos de diluição são desejáveis (BANOVIC et al., 2002). Conforme dito por Miranda et.al, revestimentos com diluição acima de 10% reduzem consideravelmente a resistência à corrosão das ligas de níquel, por aumentar o teor de ferro em sua composição. São permitidos valores iguais ou inferiores a 5% de ferro na composição geral do elemento soldado na aplicação de revestimento por ligas de níquel, de acordo com API SPEC. 6D, 2021.

Também influenciarão diretamente nas propriedades finais do material, através da microestrutura, pois durante a soldagem o material passa por ciclo térmico, que consiste no aquecimento vigoroso do material no início do processo de soldagem, a fase em que se é atingida a temperatura máxima do ciclo e a etapa de resfriamento gradual, até que a temperatura chegue ao valor inicial da chapa, que dependerá da distância do metal base em relação a fonte de calor (FERREIRA, 2020).

2.6 PROCESSO GTAW E GMAW

Diversos processos de soldagem vêm sendo utilizados para aplicação de revestimentos metálicos, tais como o processo a laser (LBW: *Laser Welding Fiber*), o processo a gás inerte de tungstênio (GTAW: *Gas Tungsten Arc Welding* ou TIG: *Tungsten Inert Gas*), o processo a arco de metal e gás (GMAW: *Gas Metal Arc Welding* ou MIG: *Metal Inert Gas* ou MAG: *Metal Active Gas*) e o processo à plasma por arco transferido (PTAW: *Plasma Transferred Arc Welding*) (SANTOS et al., 2015).

Neste estudo destacam-se as soldagens a gás inerte de tungstênio (GTAW) e a arco de metal a gás (GMAW), ambos manuais, por serem os processos aplicados no local de estudo, com a finalidade de atendimento aos requisitos propostos.

2.6.1 Processo de Soldagem GTAW

O processo GTAW, ou TIG, é um processo de soldagem que utiliza gás inerte com eletrodo de tungstênio não consumível. Se destaca pelo bom acabamento e pela alta qualidade da solda e é utilizado na soldagem de materiais mais sofisticados, como aços inoxidáveis e ligas de metais reativos, que requerem qualidade superior de acabamento. O processo GTAW é considerado um processo de baixa velocidade e baixa produtividade pois, quando se busca utilizar esse processo de soldagem de forma autógena com velocidade de soldagem elevada, é necessário que a corrente de soldagem também seja elevada para manter o cordão com tamanho satisfatório (SCHWEDERSKY et al., 2011). São características do processo de soldagem GTAW o excelente controle de energia transferida para a peça, devido ao manejo independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, tornando o processo adequado para soldas de baixas espessuras, e a eficiente proteção contra contaminação, o que permite a soldagem com materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados (MARQUES et al., 2017).

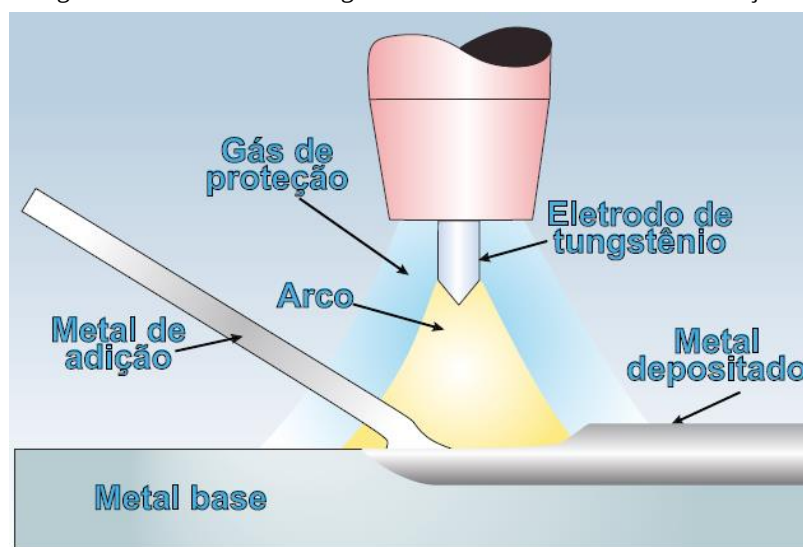
A aplicação da soldagem pode ser mecanizada ou automatizada (MODENESI, 2013). Preponderantemente ocorre de forma manual, podendo ser executada em qualquer posição, embora a mecanização do processo também seja comum e fácil de ser implementada, através do uso de dispositivos auxiliares de soldagem adequados, como braços robóticos (MARQUES et al., 2017).

Para iniciar o procedimento de execução, recomenda-se que se inicie a vazão do gás inerte alguns segundos antes da abertura do arco. Em seguida, realiza-se a abertura do arco, deixando-se a tocha parada até que haja a formação da poça de fusão. Posteriormente, faz-se a

extinção do arco com a tocha ainda em posição, para que ocorra o fluxo de gás inerte por um período (CÂNGANI, 2010).

Na soldagem GTAW um arco elétrico é utilizado como fonte de calor, mantido entre o eletrodo de tungstênio não consumível e a peça a ser soldada. Se utiliza o fluxo de gás inerte, geralmente o gás argônio ou o gás hélio, para proteção do eletrodo contra o ar circundante no arco elétrico formado entre o eletrodo e a peça que recebe a soldagem, ponto chamado de poça de fusão, conforme ilustrado na Figura 3 (RODRIGUES et al., 2022; MARQUES et al., 2017).

Figura 3 – Processo de soldagem GTAW ou TIG com metal de adição.



Fonte: Rodrigues et al. (2022).

No processo TIG/GTAW as soldas podem ser realizadas com adição de material ou por solda autógena. A poça de fusão é formada somente pelo metal base, uma vez que o gás de proteção utilizado é inerte, ocorrendo apenas a fusão do metal base. Na solda com materiais de adição, varetas do material desejado (metal) são fundidas no processo (RODRIGUES et al., 2022).

Neste processo, os consumíveis são as varetas e arames de metal de adição e os gases de proteção. Para a solda manual, os consumíveis são fornecidos na forma de varetas com comprimento em torno de 1 metro; já para a solda automática, são fornecidos no formato de bobina com diferentes comprimentos, de acordo com a capacidade dos equipamentos.

Os eletrodos de tungstênio se desgastam durante o processo, apesarem de serem classificados como não consumíveis, e devem ser recondicionados e substituídos conforme o desgaste (MARQUES; et al., 2017).

As principais vantagens deste processo são a obtenção de uma maior penetração do cordão de solda e a estabilidade do arco elétrico (CÂNGANI, 2010). Além disso, não há geração de vapores e fumos, por não existir reações entre metal-gás e metal escória, permitindo ótima visibilidade para o soldador (MARQUES; et al., 2017).

2.6.1.1 Fonte de soldagem no processo de solda GTAW

O arco elétrico na soldagem GTAW é a fonte de calor necessária para o início da execução da soldagem, e é responsável pela formação da poça de fusão e aquecimento do eletrodo. O arco elétrico consiste em uma descarga elétrica de alta frequência capaz de produzir suficiente energia térmica para união de metais por meio da fusão, atingindo elevadas temperaturas (RODRIGUES et al., 2022). O arco de soldagem apresenta, em geral, uma elevada eficiência para transformar a energia elétrica em energia térmica e transferi-la para a peça, o que combina muitas características, entre elas, a facilidade de controle, o baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores (MARQUES; et al., 2017).

O arco elétrico é protegido da contaminação atmosférica pelo gás inerte, que minimiza ou elimina as moléculas de nitrogênio, oxigênio e hidrogênio do ar atmosférico, o que explica a alta qualidade de acabamento deste tipo de solda (CÂNGANI, 2010).

Devido à elevada temperatura, o processo de soldagem GTAW trabalha com corrente contínua negativa, sendo a tocha conectada ao polo negativo da máquina de solda e a peça no polo positivo. Com corrente contínua negativa os elétrons fluem do eletrodo para a peça, garantindo maior penetração e perfil de cordão de solda estreito, devido ao mais elevado aquecimento da peça em relação ao consumível (RODRIGUES et al., 2022). Também, pode-se caracterizar o arco de soldagem pela diferença de potencial entre suas extremidades e pela corrente elétrica que circula por este (MARQUES; et al., 2017).

Para realização da abertura do arco elétrico, o espaço entre o eletrodo e a peça deve ser capaz de conduzir a corrente elétrica, variando de 2 a 5 mm, conforme a tensão selecionada. O arco elétrico gera cor e radiação eletromagnética de alta intensidade, como infravermelho, luz visível e ultravioleta, e é necessário utilizar proteção visual para manuseio (RODRIGUES et al., 2022).

Há dois sistemas de abertura de arco, o contato eletrodo-peça e o pulso de alta frequência (HF) (RODRIGUES et al., 2022), e estes são utilizados conforme a capacidade do equipamento, os requisitos de produção e a facilidade de aplicação (O'BRIEN, 2004). A abertura do arco de

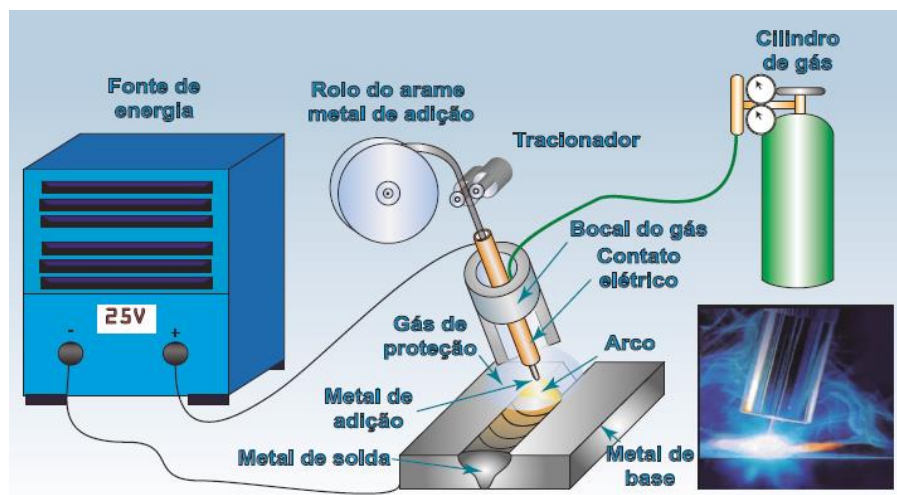
soldagem por processo de contato do eletrodo na peça oferece maior controle no início do processo, sendo ideal para peças de menor espessura. Já o modo de abertura por alta frequência proporciona maior estabilidade e controle, especialmente em metais de maior espessura ou em situações que exigem maior penetração do material depositado (O'BRIEN, 2004). Desta forma, o método pulso de alta frequência é o escolhido para a aplicação de solda de revestimento, em função da maior penetração do material aplicado.

2.6.2 Processo de Soldagem GMAW

O processo a arco de metal e gás, mais conhecido como MIG ou GMAW, utiliza o arco elétrico como fonte de calor entre o eletrodo nu consumível e o metal base. Da mesma forma que a solda GTAW, o objetivo do uso de gás de proteção tem como finalidade básica proteger a poça de fusão contra os efeitos nocivos do oxigênio contido no ar atmosférico e pode ajudar na melhoria da qualidade, do funcionamento e da produtividade na soldagem de aços, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, entre outras aplicações (TATAGIBA et al., 2012).

Como explicação do processo, o calor funde a extremidade do consumível, e normalmente é utilizado um arame sólido com alimentação automática, sem interrupções durante o procedimento, que é depositado sobre a superfície do metal base, executando a camada soldada. Na Figura 4 é possível verificar a ilustração do processo de soldagem GMAW (RODRIGUES et al., 2022).

Figura 4 – Ilustração do processo de soldagem GMAW.



Fonte: Rodrigues et al., 2022.

O arco elétrico é a fonte de calor empregada em soldagem mais utilizada por apresentar algumas vantagens, como a concentração de energia suficiente para a fusão localizada, a facilidade de controle, o baixo custo e um nível aceitável de riscos aos operadores (TATAGIBA et al., 2012). Como principal limitação da soldagem MIG/MAG, pode-se destacar a sua maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado (MARQUES et al., 2017).

O controle da soldagem garante uma transferência metálica mais uniforme, com melhoria do aspecto do cordão e menos respingos, permite que haja uma pequena poça de fusão, para a soldagem de passe de raiz ou em chapas finas e garante uma relação penetração/taxa de deposição controlada, pela distribuição de calor entre eletrodo e metal base (TATAGIBA et al., 2012). Também pode-se destacar a alta taxa de deposição e a possibilidade de soldar diferentes materiais e espessuras e ausência de remoção de escórias e limpeza na região do cordão de solda (MARQUES et al., 2017).

O controle do processo de transferência é muito importante para o processo de soldagem GMAW, pois afeta nas características do processo de estabilidade do arco, quantidade de gás absorvida pelo material depositado e solda em determinadas posições, também o nível de respingos (MARQUES et al., 2017). Destacam-se exemplos de soldagem GMAW com controle os processos: Pulsado, Pulsado com Comando Sinérgico, com pulsação térmica ou Duplo Pulso, com corrente alternada e com curto-circuito controlado eletricamente e eletromecanicamente (TATAGIBA et al., 2012).

2.6.2.1 Gás de proteção da solda

A solda GMAW, assim como a GTAW, utiliza o gás de proteção do arco e a poça de fusão, porém, diferencia-se por possibilitar a escolha de utilização de gás, ou inerte ou ativo (RODRIGUES et al., 2022). Segundo a sua natureza e composição, os gases utilizados podem influenciar as características do arco, o tipo de transferência metálica, a velocidade de soldagem, a perda por projeção (respingos), a penetração, o formato do cordão de solda, as perdas de elementos químicos, a temperatura da poça de fusão, a sensibilidade à fissuração e porosidade, a facilidade da execução da soldagem e o custo final da operação de soldagem (TATAGIBA et al., 2012).

Gases inertes são necessários na soldagem de materiais base como alumínio, titânio e os aços inoxidáveis, por serem formadores de óxidos. Eles não têm praticamente nenhuma solubilidade na maioria dos metais (TATAGIBA et al., 2012). Já para a soldagem de materiais

ferrosos, a adição de pequenas quantidades de gases ativos (contendo oxigênio) melhora sensivelmente a estabilidade do arco, pois a presença de óxidos facilita a emissão de elétrons, e a transferência de metal (MARQUES et al., 2017).

Como exemplos de gases inertes podem-se destacar o argônio (Ar) e o hélio (He), pois são gases que não reagem quimicamente com o metal de solda, enquanto os gases ativos reagem quimicamente com o material depositado de forma moderada e controlada, podendo citar o dióxido de carbono (CO₂), misturas entre Ar ou He + CO₂, podendo conter oxigênio (O₂) e, em menor escala, o nitrogênio (N₂). O Quadro 4 identifica os tipos de gás utilizados para bases de diferentes materiais (RODRIGUES et al., 2022).

Quadro 4 – Tipo de gás utilizado para tipo de material de base.

Arame	Gás			
	Ar	CO ₂	Ar-CO ₂	Ar-He
Aço carbono e baixa liga	---	100%	Máx. 50% de CO ₂ no Ar	---
Aço inoxidável austenítico	100%	---	Até 4% de CO ₂ no Ar	---
Aço inoxidável duplex	100%	---	Até 4% de CO ₂ no Ar	---
Alumínio	100%	---	---	Até 25% de He no Ar
Cobre	100%	---	---	Até 25% de He no Ar
Ligas de níquel	100%	---	---	Até 75% de He no Ar

Fonte: Rodrigues et al. (2022).

2.6.2.2 Fonte de soldagem no processo de solda GMAW

Para a soldagem GMAW, o responsável pelo fornecimento de energia elétrica é a fonte (RODRIGUES et al., 2022), sendo geralmente utilizada uma fonte, no sistema de arco elétrico, com característica de saída de tensão constante ou corrente contínua (CC+) em conjunto com um alimentador de arame de velocidade constante (MARQUES et al., 2017). Possuindo a tocha em seu polo positivo e a peça, por sua vez, em seu polo negativo, fornecendo maior concentração de calor no consumível, permitindo a deposição em velocidades elevadas do arame na poça de fusão (RODRIGUES et al., 2022).

Neste tipo de sistema, a tensão e, conseqüentemente, o comprimento do arco e a velocidade do arame permanecem aproximadamente constantes durante a operação de soldagem (MARQUES et al., 2017).

A fonte possui grande influência na qualidade, na produtividade e no custo do processo, pois interfere diretamente na diluição do consumível de solda a ser fundido no metal base. Com a CC+ é obtido um perfil de soldagem com alta diluição e penetração, arco e transferência estável, baixo salpico e boas características na soldagem (RODRIGUES et al., 2022).

As características do processo de soldagem a arco de metal a gás podem ser descritas como o método que o metal é transferido do eletrodo para a peça (O'BRIEN, 2004). Existem alguns fatores que influenciam os modos de transferências, como o tipo e a intensidade da corrente, o diâmetro e a composição do eletrodo, o comprimento energizado do arame e a composição do gás de proteção (RODRIGUES et al., 2022; O'BRIEN, 2004), a estabilidade do arco, a quantidade de gases (principalmente em uso de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvida pelo metal fundido, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados (MARQUES et al., 2017).

Existem diversos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW, sendo as mais comuns por curto-circuito, globular e spray (RODRIGUES et al.). A transferência por curto-circuito, ocorre em baixas tensões, caracterizada pela formação do curto-circuito através do toque na peça da gota formada na ponta do eletrodo (O'BRIEN, 2004), indicado para soldas em quaisquer posições (MARQUES et al., 2017). O tipo globular, ocorre em baixas correntes, sendo caracterizada pelo diâmetro da gota ser maior que o arame consumível (MARQUES et al., 2017), sendo assim, recomendada sua utilização para soldagem em áreas planas por ser facilmente influenciada pela gravidade (O'BRIEN, 2004).

Já modo de transferência spray ocorre quando o metal fundido de um eletrodo consumível é impulsionado axialmente através da solda na forma de gotículas minúsculas (O'BRIEN, 2004). É caracterizado pela alta tensão, pela alta velocidade de alimentação do arame e pela alta corrente na utilização, proporcionando alta taxa de deposição com elevada penetração (RODRIGUES et al., 2022), com cordão de solda suave e regular (MARQUES et al., 2017). É indicada para soldas de espessuras elevadas (RODRIGUES et al., 2022), podendo ser usado em qualquer posição de soldagem, sendo o mais indicado método para soldas de revestimento (O'BRIEN, 2004).

2.6.3 Variáveis que afetam a diluição no processo de soldagem GTAW

Os processos de revestimento por soldagem utilizam, na maioria das vezes, soldagem a arco com eletrodos consumíveis. Conhecer os efeitos de cada variável desse processo de revestimento aplicado por soldagem se torna imprescindível, pois a diluição é de extrema importância na aplicação do revestimento (RODRIGUES et al., 2022). Na solda de união de junta, por exemplo, as etapas de controle do processo são de menor importância, pois não requerem tanto controle da diluição e de fabricação, quando comparadas à solda de revestimento (KEJELIN, 2021).

Uma variável fundamental para a garantia da qualidade dos processos de soldagem é a correta seleção dos parâmetros de soldagem (RODRIGUES et al., 2022). As escolhas dos parâmetros de soldagem são feitas de acordo com o material a ser soldado, da espessura da peça, posição da aplicação de soldagem, bem como do uso de metal de adição ou não. Devido a isso, diversas são as variáveis de operação nos processos de soldagem (MARQUES et al., 2017).

Algumas variações são de alta importância no processo GTAW de forma a manter a excelente qualidade do metal de solda depositado (RODRIGUES et al., 2022), podendo destacar, entre elas, o comprimento do arco, a corrente, a velocidade de soldagem e a vazão de gás de proteção (MARQUES et al., 2017).

No caso do revestimento aplicado pelo processo de soldagem, a utilização de arame consumível quente aumenta a taxa de deposição do metal fundido, devido ao melhor aproveitamento do arco elétrico (RODRIGUES et al., 2022), este, por sua vez, está ligeiramente ligado à qualidade da soldagem.

Pode-se caracterizar o comprimento do arco a partir da distância da ponta do eletrodo até superfície que irá receber o revestimento. Para uma determinada corrente de soldagem e gás de proteção, o aumento do comprimento do arco provoca o aumento da tensão, e, como resultado, o cordão de solda será mais largo e raso, com menor penetração (MARQUES et al., 2017).

Já a corrente de soldagem é responsável pela maior energia da soldagem no processo e maior taxa de material depositado (O'BRIEN, 2004), selecionada diretamente na fonte na energia. Também, o reforço do cordão tende a diminuir com o aumento da corrente (MARQUES et al., 2017).

A soldagem GMAW pode ser utilizada com corrente contínua e alternada, a escolha varia conforme o metal a se soldado. Com corrente contínua negativa, obtém-se cordões de solda com penetração mais profundas e rápida velocidade de soldagem, com maiores temperaturas localizadas na região do metal base. A corrente alternada é utilizada quando o cordão de solda requerido for intermediário entre profundidade e largura (O'BRIEN, 2004).

Além da corrente, a velocidade de aplicação do revestimento soldado também influencia na penetração e largura do cordão soldado. Em alguns casos, a velocidade de deslocamento é definida como um objetivo, para dar produtividade ao processo, sendo as demais variáveis selecionadas para atingir a configuração de solda desejada nessa velocidade (O'BRIEN, 2004). Quanto maior for a velocidade, menor será as características do cordão. Em resumo, uma maior velocidade de soldagem, é boa para o processo, por apresenta melhor eficiência e produtividade

da operação, com redução de custos pra a empresa, porém velocidades altas podem induzir a descontinuidades do cordão (MARQUES et al., 2017).

A qualidade do cordão de solda é diretamente influenciada pela velocidade de alimentação do arame e pela vazão do gás de proteção. A velocidade de alimentação define a quantidade de arame depositado por comprimento de solda, sendo essa muito baixa, ocorre o aumento da penetração e nivela o cordão de solda, por sua vez, pode produzir cortes inferiores na solda, falta de preenchimento e trincas. Com o aumento da velocidade, produz um cordão mais convexo, porem pode diminuir a penetração do material depositado (O'BRIEN, 2004) e até causar uma fusão parcial no metal de adição (MARQUES et al., 2017). A baixa vazão do gás resulta em proteção insuficiente, que pode levar a oxidação do cordão, porosidades, etc. Já o contrário, vazão muito elevada, pode causar turbulência no fluxo de gás, resultando em efeitos semelhantes aos de baixa vazão (MARQUES et al., 2017).

Existem outras variáveis secundárias que podem prejudicar a qualidade do cordão de solda, como o ângulo do eletrodo não consumível de tungstênio, a distância do bocal da peça, e na soldagem mecanizada a posição da tocha, o tipo de gás (O'BRIEN, 2004).

2.6.4 Variações no processo GMAW

Para determinar a qualidade e atendimento aos requisitos de soldagem para solda GMAW, são observadas diversas variáveis, como a velocidade de alimentação do eletrodo, polaridade do eletrodo, comprimento do arco, velocidade de deslocamento e o diâmetro do eletrodo (O'BRIEN, 2004; RODRIGUES et al., 2022).

O controle dessas variáveis é essencial para a qualidade da solda, exercendo influência sobre o cordão de solda em suas propriedades mecânicas, nas descontinuidades e estabilidade do arco (BARBEDO, 2017). Cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, porém não agem de forma separada, a mudança de uma variável, requer a mudança de outras características para produzir o cordão de solda desejado (O'BRIEN, 2004).

A corrente da solda é diretamente proporcional com a velocidade e taxa de fusão do eletrodo, ou seja, arames com diâmetros maiores suportam altos valores de corrente, gerando maiores valores de penetração e taxa de fusão (BARBEDO, 2017). Com o aumento da velocidade de alimentação do eletrodo, ocorre o aumento da corrente elétrica, devido ao aquecimento necessário para fusão do arame consumível. Isso também ocorre ao aumentar o diâmetro do eletrodo, ou seja, ocorre o aumento de tensão (O'BRIEN, 2004). O aumento na corrente de soldagem, ou seja, o aumento da velocidade de alimentação do arame, resulta no

aumento da profundidade e largura da penetração da solda, aumento na taxa de deposição e aumento do cordão de solda (RODRIGUES et al., 2022).

A polaridade do eletrodo é usada para definir a conexão elétrica da tocha em relação a fonte de energia de corrente contínua. A maioria dos processos utiliza corrente contínua positiva, ou seja, a tocha ligada na polaridade positiva da fonte de energia, produzindo um arco estável, transferência de metal suave, poucos respingos, cordão de solda com boa característica e maior profundidade de penetração (O'BRIEN, 2004).

A tensão do arco ou comprimento do arco está diretamente ligada com a qualidade do cordão de solda, evitando porosidades e fragilização devido a absorção do nitrogênio e oxigênio. Com um comprimento de arco muito longo, a proteção do gás tende a oscilar, produzindo respingos (O'BRIEN, 2004), tendendo a achatar o cordão de solda, aumentar a largura da zona de fusão e afetar a penetração do metal soldado, causando porosidade por contaminação pelo ar atmosférico (RODRIGUES et al., 2022). Já o contrário, arco muito curto, a ponta do eletrodo causa curto-circuito na poça de fusão, causando instabilidade no arco (O'BRIEN, 2004), permitindo a entrada de nitrogênio e oxigênio na zona de fusão, produzindo porosidades. Resultando em um cordão de solda estreito, mais alto e alta penetração (RODRIGUES et al., 2022).

Outro fator de interferência é a vazão do gás de proteção. O processo de solda GMAW exige fluxo de gás para proteção da poça de fusão e das gotas de transferência, para controle de transferências metálicas e características sobre a geometria e propriedades da solda (BARBEDO, 2017). Com a taxa de vazão muito elevada, causa turbulência no gás permitindo a entrada de oxigênio e nitrogênio, contaminando a zona de fusão da soldagem. Por outro lado, com vazão muito baixa, não há quantidade suficiente de gás para proteção da poça de fusão. (O'BRIEN, 2004; RODRIGUES et al., 2022).

A velocidade de deslocamento é definida como a taxa linear na qual o arco é movido ao longo da junta soldada (O'BRIEN, 2004). Exerce influência na taxa de deposição e na geometria do cordão (BARBEDO, 2017), sendo assim, se velocidade de deslocamento for menor, menor será a quantidade de calor cedida ao metal base (RODRIGUES et al., 2022), e maior será a deposição de material fundido, ocasionando um cordão de solda largo com menor penetração, pois o ponto de fusão será no material já depositado e não no metal base (O'BRIEN, 2004), podendo, também, causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido ao superaquecimento na região soldada. Já em uma situação inversa, com maior velocidade de deslocamento, o metal aplicado pode ser insuficiente, podendo ocasionar algumas descontinuidades como mordeduras, falta de fusão e falta de penetração (RODRIGUES et al.,

2022), o que ocorre devido à pressão da grande quantidade de material consumível derretido, diminuindo a força do arco de fusão (BARBEDO, 2017).

O diâmetro do eletrodo é outro fator que altera as características da solda, pois a utilização de um eletrodo maior requer corrente mais alta do que um eletrodo menor com as mesmas características de transferência de metal (BARBEDO, 2017). Correntes mais altas produzem fusões adicionais do consumível, com maiores depósitos e utilização de gás, embora resulte em taxa de deposição maiores com mais penetração (O'BRIEN, 2004).

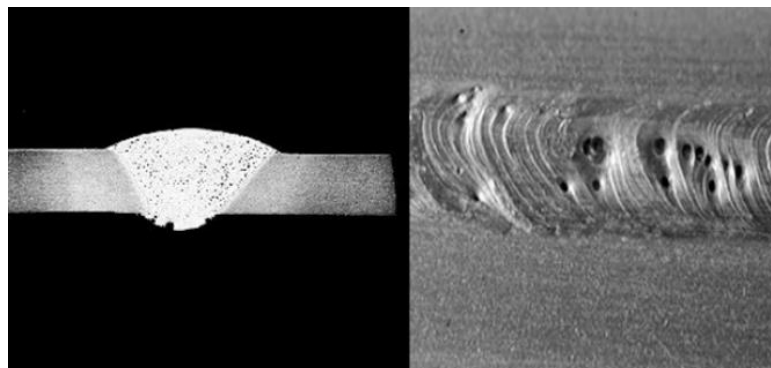
2.6.5 Descontinuidades do processo de soldagem

Como resultados da utilização de parâmetros incorretos na soldagem, ocorre a formação das descontinuidades, como porosidade, falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e trincas (RODRIGUES et al., 2022).

2.6.5.1 Porosidade

Caracterizada por um vazio formado pelo aprisionamento de gás durante a solidificação da poça de fusão, causada pela baixa ou elevada vazão de gás, deslocamento da coluna de gás por condições atmosféricas, distância entre eletrodo e peça, bocal da tocha pequeno, inclinação excessiva da tocha de soldagem favorecendo a falta de proteção na poça de fusão e impurezas, como graxa, óleo e umidade na região da solda (RODRIGUES et al., 2022), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Porosidade no cordão de solda.



Fonte: Rodrigues, 2022.

Esse aprisionamento é resultado da solubilidade dos gases na poça de fusão durante o resfriamento da peça, ou ainda de reações químicas do metal de solda (BARRA et al., 1999).

2.6.5.2 Falta de fusão

Caracteriza-se por uma falta de fusão localizada, ou seja, ausência de continuidade de fusão entre metal depositado e o metal base (BARRA et al., 1999). Ocorre através da utilização de corrente elétrica insuficiente durante a soldagem, manipulação incorreta da tocha, preparo inadequado da peça e velocidade excessiva na deposição (RODRIGUES et al., 2022), conforme a Figura 6.

Figura 6 – Falta de fusão na solda GTAW.



Fonte: Rodrigues, 2022.

2.6.5.3 Falta de Penetração

Caracterizada pela falta de metal de adição na raiz da solda, sendo causada pela preparação inadequada da peça, corrente insuficiente, velocidade excessiva da deposição do cordão e manipulação incorreta da tocha (RODRIGUES et al., 2022; BARRA et al., 1999).

2.6.5.4 Mordedura

Trata-se do não enchimento da área durante a fusão do metal base na margem do cordão de solda, causada pela corrente excessiva e incorreta utilização da tocha (RODRIGUES et al., 2022), ou seja, descontinuidades em forma de depressão, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de mordedura.



Fonte: Rodrigues, 2022.

Em uma solda submetida a tensões, as mordeduras servem como pontos iniciais de ruptura, por serem concentradores de tensões (BARRA et al., 1999).

2.6.5.5 Trincas

Trincas são descontinuidades originadas na região soldada em função da sobreposição no limite de resistência à ruptura (BARRA et al., 1999). Podem ocorrer no cordão de solda durante o resfriamento e a solidificação da poça de fusão, motivadas por tensões térmicas intensas geradas pela dilatação e contração do metal de solda aplicado. Na Inconel 625, elementos como enxofre e fósforo favorecem a formação de eutéticos de baixo ponto de fusão, agravando esse fenômeno (KOU, 2021).

Quando o arco é interrompido abruptamente e a última porção de metal fundido não preenche adequadamente o cordão, surgem trincas superficiais, causadas pela contração durante a solidificação na última poça de fusão, conhecidas por trincas de cratera (RODRIGUES et al., 2022; KOU, 2021).

Trincas por hidrogênio, conhecidas como trincas frias, ocorrem na zona termicamente afetada, sendo resultantes da difusão do hidrogênio absorvido do processo, através da umidade, consumíveis e limpeza inadequada da peça (BARRA et al., 1999; KOU, 2021). O hidrogênio fica retido na microestrutura austenítica endurecida, reduzindo a ductibilidade e fragilizando o aço, favorecendo o surgimento de trincas com a combinação entre resfriamento rápido e tensões residuais (KOU, 2021).

Durante o aquecimento da ZTA, as fases secundárias como carbeto, sulfeto e eutéticos fundem intergranularmente, causando liquação localizada. Ocorre quando os precipitados de baixo ponto de fusão, segregados no contorno, liquefazem e geram zonas frágeis (KOU, 2021). Na Inconel 625, a presença de Nb, C e fases Laves pode se liquefazer, levando à trincas sob

tensões térmicas, sendo conhecida por trincas de liquação (KOU, 2021; RODRIGUES et al., 2022).

Ocorrendo em aços laminados, a decoesão lamelar se caracteriza por trincas paralelas à superfície, provocadas por tensões perpendiculares e inclusões de enxofre ou sulfetos (KOU, 2021).

2.6.6 Ensaios necessários para qualificação do processo

Para a qualificação do processo de solda, a realização de alguns ensaios é imprescindível, a fim de garantir a qualidade e a existência de características mecânicas e químicas do revestimento aplicado. Utilizando uma peça de sacrifício, realiza-se o revestimento de Inconel 625 na peça por processo de soldagem, retifica-se a peça, que passa a ficar com espessura de 8 mm de metal base, e 2,5 e/ou 3 mm de camada de revestimento, e são retirados os corpos de provas com larguras de 12 mm e/ou 25 mm, dependendo do ensaio a ser realizado.

Baseando-se na norma ASME IX (2023), são necessários para qualificação os seguintes ensaios:

- a) Realização de ensaios não destrutivos, como líquido penetrante na camada de revestimento, aplicado em 3mm da espessura do revestimento, após usinagem. Realizado conforme critérios da ASME IX (2023), item QW-453, a fim de verificar a integridade da solda.
- b) Análise química do revestimento soldado, realizado a 2,5mm da linha de fusão do revestimento soldado, de acordo com a Norma API 6D, não podendo ser superior a 5%, com a finalidade de detectar se houve alteração na composição química da solda.
- c) Análise química do revestimento, a 3 mm de altura, e do metal base, de acordo com ASTM A751, para verificação do Carbono Equivalente (CE), a fim de investigar se houve alteração na composição química da solda e do metal base.
- d) Medição de microdureza Vickers (HV) no revestimento e na zona termicamente afetada.
- e) Ensaio de metalografia no revestimento soldado e na zona termicamente afetada, com ampliação de 400 x.
- f) Ensaio de corrosão no revestimento soldado, seguindo ASTM G48, prática A, com imersão do revestimento soldado em solução de ácido clorídrico.

- g) Ensaio de dobramento lateral conforme ASME IX, item QW-453, com o objetivo de verificar a qualidade da fusão da solda.

A partir desses ensaios, é possível verificar a qualidade do revestimento soldado, assim como analisar as principais diferenças mecânicas entre os métodos de soldagem GTAW E GMAW.

2.6.7 Processos futuros e tendências

Atualmente, existe no mercado alguns métodos alternativos para aplicação de revestimento de Inconel 625 em superfícies de aço carbono, que não envolvem soldagem. Entre eles, pode-se citar spray térmico, *laser cladding* e HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*).

2.6.7.1 Spray térmico

Utiliza matéria prima em forma de pó, com morfologia da partícula, tamanho e distribuição de tamanhos apropriados, depositado por processo de pulverização em temperatura elevada. Utiliza-se alta energia, o pó é fundido à peça no impacto da partícula, o qual se deforma plasticamente e com o resfriamento do pó. Com o impacto, as partículas formam ligações entre si e com o substrato, garantindo dureza e resistência do revestimento aplicado (BOSE, 2018).

2.6.7.2 Laser cladding

O processo de soldagem de revestimento a laser utiliza eletrodo como matéria prima do processo. Possui diluição extremamente baixa, baixa porosidade e boa uniformidade da superfície, características que garantem alta qualidade no revestimento, assim como as características mecânicas e químicas da liga. Possui características como elevada densidade potência e rapidez no processo devido à potência e a soldagem pode ser realizada em um único passo, sem distorções e zona termicamente afetada (ZTA), bom acabamento e controle da espessura (GOMES, 2016).

2.6.7.3 HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*)

O processo de HVOF utiliza a combustão do gás como fonte de energia para derreter e acelerar as partículas de pó, e é utilizado o gás oxigênio para combustão. Algumas características do processo de HVOF são a alta eficiência de deposição e a boa adesão das

partículas do material a ser aplicado, que possuem baixo teor de óxidos e porosidade. O processo de HVOF permite a aplicação das partículas em maior velocidade, com menor taxa de calor, garantindo assim dureza e ductibilidade do material (LATKA, et.al, 2020). Destaca-se pela operação em menores temperaturas e homogeneidade do revestimento aplicado, obtendo baixa porosidade e elevada aderência na aplicação, e também pela alta velocidade de aplicação (BRANDOLT, 2014).

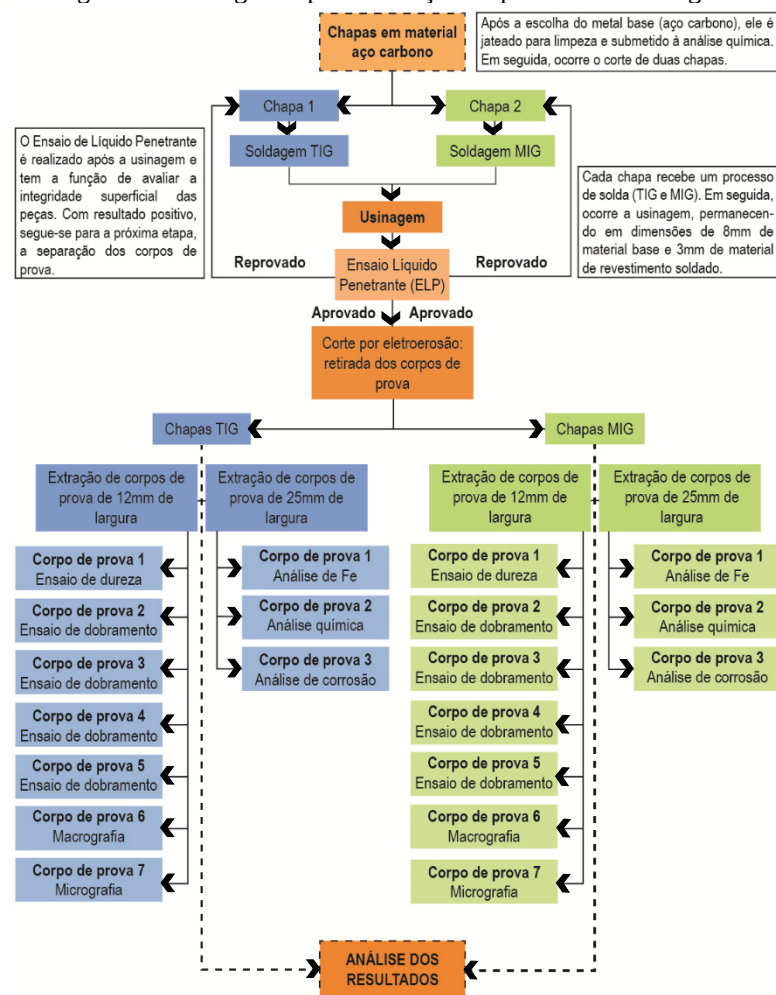
3 METODOLOGIA

Considerando que o objetivo deste estudo é realizar uma análise comparativa entre os processos de soldagem GTAW e GMAW para aplicação de revestimento metálico de Inconel 625 em válvulas para uso na indústria do petróleo e gás, utilizam-se as variáveis de qualidade, tempo de produção e viabilidade técnica e econômica do processo para comparar os métodos de soldagem. Para viabilizar o estudo comparativo serão realizados ensaios em corpos de prova e os resultados dos ensaios serão comparados por meio de tabelas, quadros e gráficos.

A aplicação do revestimento soldado nas chapas de aço carbono foi realizada na empresa Micromazza, seguida dos ensaios, que foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos de Caxias do Sul (LAMEC) e no laboratório de ensaio da Empresa Micromazza.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas duas chapas de material carbono que foram convertidas em 20 corpos de prova no total, conforme descrito na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma para avaliação do processo de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A preparação dos corpos de prova inicialmente ocorreu com a limpeza das chapas. Em seguida, elas foram submetidas à análise química, e, após, à aplicação do revestimento de Inconel 625 por processo de soldagem.

Nesta etapa, cada uma das chapas recebeu o revestimento por um método, a primeira com o processo GMAW e a segunda com processo GTAW, utilizando as variáveis de soldagem já qualificadas pelos documentos de soldagem da Micromazza, por inspetor de solda NII, atendendo a norma ASME IX. Os parâmetros aplicados na soldagem do revestimento estão descritos no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros de soldagem.

	Processo GTAW	Processo GMAW
Nº de passes	7 passes	5 passes
Espessura de cada passe	8 mm	6,3 mm
Gás utilizado	Argônio	Gás argônio + hélio
Vazão do gás	11 a 12 L/min	13 a 15 L/min
Tipo de corrente	Corrente contínua negativa	Corrente contínua positiva
Corrente	120 a 160 A	140 a 190 A
Tensão	12 a 16 V	21 a 24 V
Método de Transferência	Contato com a peça	Spray
Velocidade de aplicação	8,5 a 12 cm/min	20 a 25 cm/min
Metal de Adição utilizado	ASW ER NiCrMo-3, com 2,4 a 3,2 mm de diâmetro	ASW ER NiCrMo-3, com 1 a 1,2 mm de diâmetro

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a aplicação do revestimento soldado, as chapas foram submetidas ao processo de retífica, para alinhamento das dimensões de espessura inicial dos corpos de prova. Nessa etapa, foi verificada a integridade interna da solda, pois foi realizada retífica na camada de revestimento soldada, que inicialmente possuía 8 e 6 mm, para 3 mm de espessura.

Em seguida, foi realizado ensaio de líquido penetrante, seguindo os parâmetros da ASME VIII para aplicação e critério de aprovação do mesmo.

O ensaio de líquido penetrante consiste na aplicação de um produto penetrante, que penetra nas falhas da solda, sendo utilizado o VP 30 da marca MetalChek, com tempo de secagem de 10 minutos. Utilizou-se o revelador D70, da mesma marca, para revelação da penetração. Antes da aplicação do revelador, a peça foi submetida à limpeza com o removedor E59, retirando toda a graxa e óleo existente na superfície.

Para a aprovação do líquido penetrante, observa-se as indicações linear e arredondadas, as quais não podem apresentar um comprimento maior que três vezes a largura da amostra, para as indicações lineares e, indicação arredondada apresentando formato circular ou elíptico maior que 5mm ou quatro ou mais indicações arredondadas alinhadas, separados por uma distância menor que 1,5 mm.

Com o líquido penetrante aprovado, iniciou-se o corte dos corpos de prova, conforme a Figura 9, através do método de corte por eletroerosão, para evitar contaminação do corpo de prova.

Figura 9 – Corte dos corpos de prova.

		SOLDA	DESCARTAR	
1X	CP A		ANÁLISE Fe	25 mm
1X	CP B		ANÁLISE QUÍMICA	25 mm
1X	CP C		PERFIL DUREZA	12 mm
	CP D1		DOB. LATERAL	12 mm
	CP D2		DOB. LATERAL	12 mm
	CP D3		DOB. LATERAL	12 mm
	CP D4		DOB. LATERAL	12 mm
1X	CP E		MACRO 5x	12 mm
1X	CP F		MICRO 400x	12 mm
1X	CP G		CORROSÃO	25 mm
SOBRA CP W16		SOLDA	GUARDAR SOBRA	

Fonte: o autor.

Foram cortados 7 corpos de prova de cada chapa (CP A, CP B, CP C, CP D, CP E, CP F e CP G) que foram submetidos aos ensaios químico, de dureza, de dobramento, macrográfico, micrográfico e de corrosão, para cada processo de soldagem.

3.1 ANÁLISE DA QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS

3.1.1 Ensaio químico

As análises químicas foram executadas em três regiões do corpo de prova (CP A e B) à 2,5 mm da linha de fusão do revestimento, à 3 mm da linha de fusão do revestimento, e no metal base após a aplicação da solda. O método utilizado para realização da análise foi espectrometria por emissão ótica, em temperatura ambiente, realizado de acordo com a norma ASTM A751.

3.1.2 Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza foi utilizado o CP C, sobre o qual foi executado polimento na área de teste e realizada a medição com o microdurômetro em escala HV0.5. Foram executadas cinco medições em cada área, na zona de interface e no revestimento, e em seguida foi calculada a média das medições.

3.1.3 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento ocorreu de acordo com os métodos e critérios da ASME IX, em quatro corpos de prova, através de dispositivo de dobra guiado padronizado, com um cutelo de 40 mm de diâmetro com distância de 60 mm entre os roletes, curvando o corpo de prova em um ângulo 180°. O corpo de prova não pode apresentar descontinuidades no cordão de solda e na zona de fusão.

3.1.4 Ensaio macrográfico

Para realização do ensaio macrográfico (CP E), primeiramente ocorreu o processo de preparação da amostra. Ela foi submetida ao processo de polimento, que iniciou pelo lixamento da amostra, com lixas de granulometria entre 150 a 2400, girando a amostra de 90° em 90°, a fim de eliminar os riscos da etapa anterior. Após o processo de polimento, as amostras foram atacadas quimicamente, utilizando ácido nital 2%, solução composta de 2 ml de ácido nítrico puro (HNO_3) e 93 ml de álcool etílico, e Marbe's, solução composta de 10g de sulfato de cobre (CuSO_4), 50 ml de ácido clorídrico (HCl) e 50 ml de água destilada (H_2O), seguindo os requisitos da norma ASTM E381.

Após o ataque, a amostra foi lavada com álcool etílico e secada com ar quente. Finalizado este processo, foi realizada a leitura junto ao macroscópio, com ampliação óptica de 5 vezes da seção.

Para o critério de aceitação utiliza-se a norma ASME IX. Não é permitido que o CP apresente rachaduras, e deve haver penetração completa da junta, com fusão completa do metal de solda e do metal base.

3.1.5 Ensaio micrográfico

O método de preparação da amostra é igual ao ensaio macrográfico (item 3.4).

Para o ataque da amostra, é utilizado o Marbe's, deixando em contato com a superfície por 90 segundos, de acordo com a norma ASTM A262, prática A, para verificação da presença de corrosão intergranular e fases intermetálicas/ deletérias

A leitura foi realizada utilizando um microscópio, onde se verificou a microestrutura do metal base, do revestimento aplicado e da seção de fusão do metal aplicado com o metal base, com aumento de 200 x e 500 x para a região de interface e de revestimento. Foi utilizado o CP F para esse ensaio.

3.1.6 Ensaio de corrosão

O ensaio de corrosão foi realizado de acordo com ASTM G48, método A, com imersão da amostra em ácido férrico, e foi analisada a perda de massa do material.

Para esse ensaio, retirou-se do corpo de prova (CP G) a parte do revestimento soldado, que foi preparado para o ensaio, por meio de lixamento e polimento, remanescendo com dimensões finais de 27,10mm x 24,10mm x 2,10mm. Após polida, a amostra foi pesada e mergulhada em 600 ml de solução, sendo composta por uma dissolução 100g de ácido férrico (FeCl_3) em 900 ml de água (H_2O).

Após a imersão em ácido, a amostra foi retirada, enxaguada em água e levada para limpeza em aparelho ultrassônico durante 10 minutos. Após o tempo estabelecido, realizou-se a medição de massa. Posteriormente, repetiu-se este processo até a amostra apresentar uma estabilidade de perda. Sendo possível calcular a perda de gramas por m^2 por meio da quantidade de gramas perdida dividida pela área total, conforme a Equação 2, sendo um máximo permitido, para as dimensões do corpo de prova, de 0,0061 g/m^2 , e obtendo uma taxa média anual de corrosão de acordo com a Equação 3.

$$\text{Área} = 2 \cdot (A \cdot B) + (A \cdot C) + (B \cdot C) \quad (2)$$

Onde:

A = Comprimento (m);

B = Largura (m);

C = Altura (m).

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{(K \cdot W)}{(A \cdot T \cdot D)} \quad (3)$$

Onde:

K = Constante (retirada da tabela 1, da norma ASTM G1, equivale a $8,76 \cdot 10^{-4}$ (mm/ano);

T = Tempo de exposição horas;

A = Área em cm^2 ;

W = Massa perdida em gramas;

D = Densidade em g/cm^3 .

3.2 TEMPO DE OPERAÇÃO

Além dos ensaios, foi realizado um levantamento do tempo de solda para cada processo, sendo estes cronometrados.

3.3 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Foi realizada análise da viabilidade dos processos. Os aspectos avaliados e balizadores desta análise foram a realização da solda em peças de diâmetros menores e em locais de difícil acesso (viabilidade técnica), levando em consideração o consumo de gás, consumo de arame e valor dos mesmos (viabilidade econômica).

3.4 TABULAÇÃO DOS RESULTADOS

Em seguida, os resultados dos ensaios foram comparados por meio de tabelas, quadros e gráficos.

4 RESULTADOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos de Caxias do Sul (LAMEC) e no laboratório de ensaios da Empresa Micromazza. Foram elaboradas tabelas com os indicadores tolerados, ou seja, os estabelecidos pelas normativas vigentes, e os indicadores encontrados nos ensaios realizados.

4.1 QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS

4.1.1 Análise de composição química

Através da análise química do metal base pós solda, conforme a Tabela 1, apresentou concentração de carbono de 0,50%, 0,68% de manganês, 0,016% de fósforo, 0,013% de enxofre, 0,18% de silício, 0,008% de níquel, 0,01% de cromo, 0,001% de molibdênio e 0,007% de cobre todos de acordo com os parâmetros do aço carbono IC 1050, estabelecidos normativamente mediante a ASTM A732, também conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Análise química do metal base.

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	W
Parâmetros aço carbono IC 1050 – ASTM A732	0,50 a 0,55	0,70 a 1,00	Máx. 0,04	Máx. 0,045	0,20 a 1,00	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 1,00	Máx. 0,25	Máx. 0,10
Resultados médio carbono IC 1050	0,506	0,721	0,009	0,012	0,202	0,015	0,018	0,003	0,008	0,005

Fonte: Elaborada pelo autor com base na ASTM A732.

A Tabela 2 descreve os resultados da análise de composição química da região do revestimento dos corpos de prova CP B.

Tabela 2 – Análise de composição química Inconel 625.

	Elemento de composição									
Processo de Soldagem	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Mn	Si	Ti	Al	C
% tolerado	58,0 (mín.)	20,0 - 23,0	8,0 - 10,0	3,15 - 4,15	5,0 (máx.)	0,5 (máx.)	0,5 (máx.)	0,4 (máx.)	0,4 (máx.)	0,1 (máx.)
GTAW	61,3	18,80	8,26	3,56	6,77	0,072	0,196	0,215	0,243	0,096
GMAW	63,6	20,14	8,96	3,82	1,95	0,054	0,172	0,225	0,224	0,076

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi possível constatar uma concentração de ferro acima do tolerado e de cromo abaixo do especificado pela norma ASME BPVC II – Part C, pelo processo de soldagem GTAW. Estima-se que esses elementos, nas configurações em que se encontram, alteram as características de resistência a corrosão do Inconel 625, tornando-o menos resistente à corrosão. Já a concentração de ferro acima do especificado indica alta diluição, sendo absorvido do material base, tendo como consequência a formação de fases intermetálicas frágeis e o aumento da dureza do aço, e como consequência, a diminuição da tenacidade do aço (KAH et.al, 2015).

Já no processo de soldagem GMAW, a composição química do Inconel 625 permaneceu de acordo com o especificado.

As análises químicas também foram realizadas à 2,5 mm da linha de fusão do revestimento, de acordo com Tabela 3.

Tabela 3 – Análise de composição química à 2,5 mm.

Processo de Soldagem	Elemento de composição									
	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	Mn	Si	Ti	Al	C
% tolerado	58,0 (mín.)	20,0 - 23,0	8,0 - 10,0	3,15 - 4,15	5,0 (máx.)	0,5 (máx.)	0,5 (máx.)	0,4 (máx.)	0,4 (máx.)	0,1 (máx.)
GTAW	62,2	19,01	8,52	3,73	5,20	0,0645	0,198	0,219	0,246	0,095
GMAW	62,5	19,88	8,82	3,76	3,71	0,0589	0,180	0,224	0,230	0,073

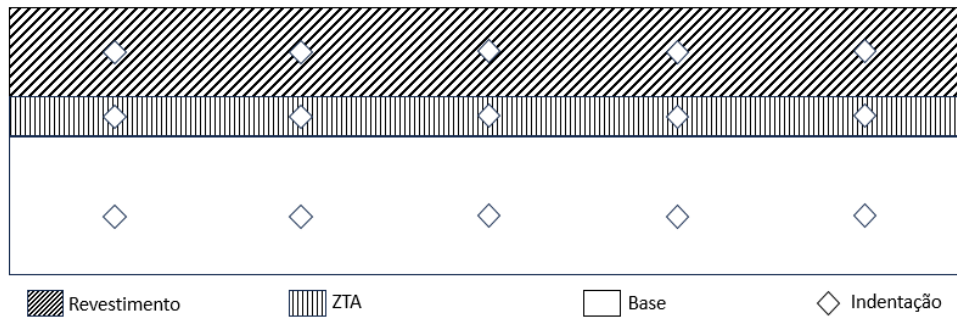
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a análise química realizada em uma região mais próximo a linha de fusão, é possível verificar uma concentração mais alta de todos os elementos presente no revestimento, à medida que se afasta da linha de fusão, a composição química do Inconel 625 se torna mais próxima à análise do material de origem.

4.1.2 Ensaio de microdureza Vickers

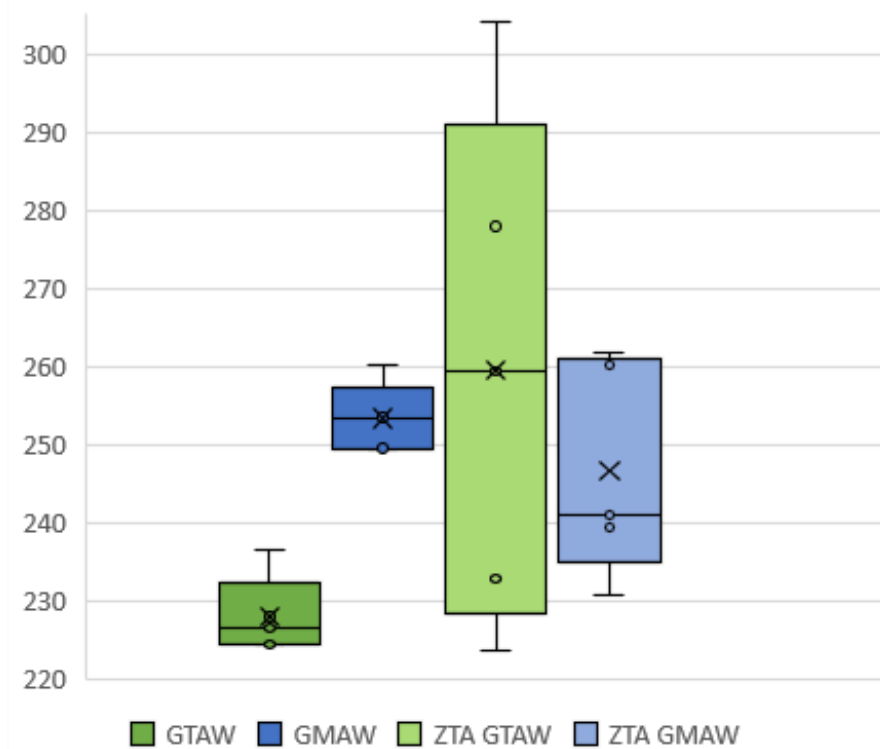
A partir do ensaio de microdureza foi possível constatar uma diminuição gradual de dureza média nos corpos de prova da soldagem GTAW, em relação ao revestimento à ZTA, ou seja, a região de interface apresentou dureza mais elevada. Para o processo GMAW, foi encontrado dureza mais elevada no revestimento, de acordo com as indentações realizadas conforme a Figura 10. Na Figura 11 verifica-se os valores encontrados para a dureza dos processos de soldagem.

Figura 10 – Mapa dos pontos de medição.



Fonte: O autor.

Figura 11 – Resultados do ensaio de dureza Vickers para os processos de soldagem.



Fonte: O autor.

Os valores de dureza encontrados para o revestimento estão de acordo com a especificação do Inconel 625, entre 150 HV e 320 HV.

Para o processo de soldagem GTAW, entende-se que, devido à maior concentração de carbono no metal base e ao maior aquecimento durante o processo de soldagem, houve a migração dos elementos da base para o revestimento, elevando a dureza da região da ZTA, com maiores amplitudes entre as medidas, deixando o material mais frágil.

Já no processo de soldagem GMAW, apresentou valores com menores variações, com a zona de interface do revestimento com dureza não superior ao do revestimento, ocasionando

boa resistência mecânica do revestimento, conforme os ensaios de dobramento realizado, e, com maior resistência ao desgaste e corrosão, de acordo com ensaios de perda de massa realizado.

4.1.3 Ensaio de dobramento

Realizado o ensaio de dobramento nos CP's D1, D2, D3 e D4, obteve-se os resultados no Quadro 6.

Quadro 6 – Ensaio de dobramento.

Identificação dos CP's	Tolerância	Análise dos Resultados GTAW	Análise dos Resultados GMAW
D1	defeitos < 3,2 mm	01 defeito > 3,2 mm	Sem defeitos
D2	defeitos < 3,2 mm	01 defeito < 3,2 mm	Sem defeitos
D3	defeitos < 3,2 mm	02 defeitos < 3,2 mm	Sem defeitos
D4	defeitos < 3,2 mm	03 defeitos < 3,2 mm	01 defeitos < 3,2 mm

Fonte: O autor.

Compreende-se que a energia de soldagem aplicada para o processo GTAW é maior, em comparação ao processo GMAW, de acordo com os processos qualificados da empresa, o que favoreceu o endurecimento do metal base e do metal da zona termicamente afetada, tanto quanto, para a precipitação de fases intermetálicas frágeis com baixa tenacidade.

Uma consequência do endurecimento do metal base e da zona termicamente afetada é a mudança da composição química e a ductibilidade do material resultante para o dobramento, assim apresentando maiores defeitos, possíveis micro trincas e fases intermetálicas frágeis, o qual proporciona maior predominância de defeitos durante o ensaio de dobramento.

Apesar de ter ocorrido ruptura em um dos corpos de prova de soldagem GTAW, através de uma microtrinca pontual no revestimento, os corpos de prova mostram resultados satisfatórios mediante o ensaio, mostrando boa ductilidade geral, mesmo com os defeitos apresentados no ensaio.

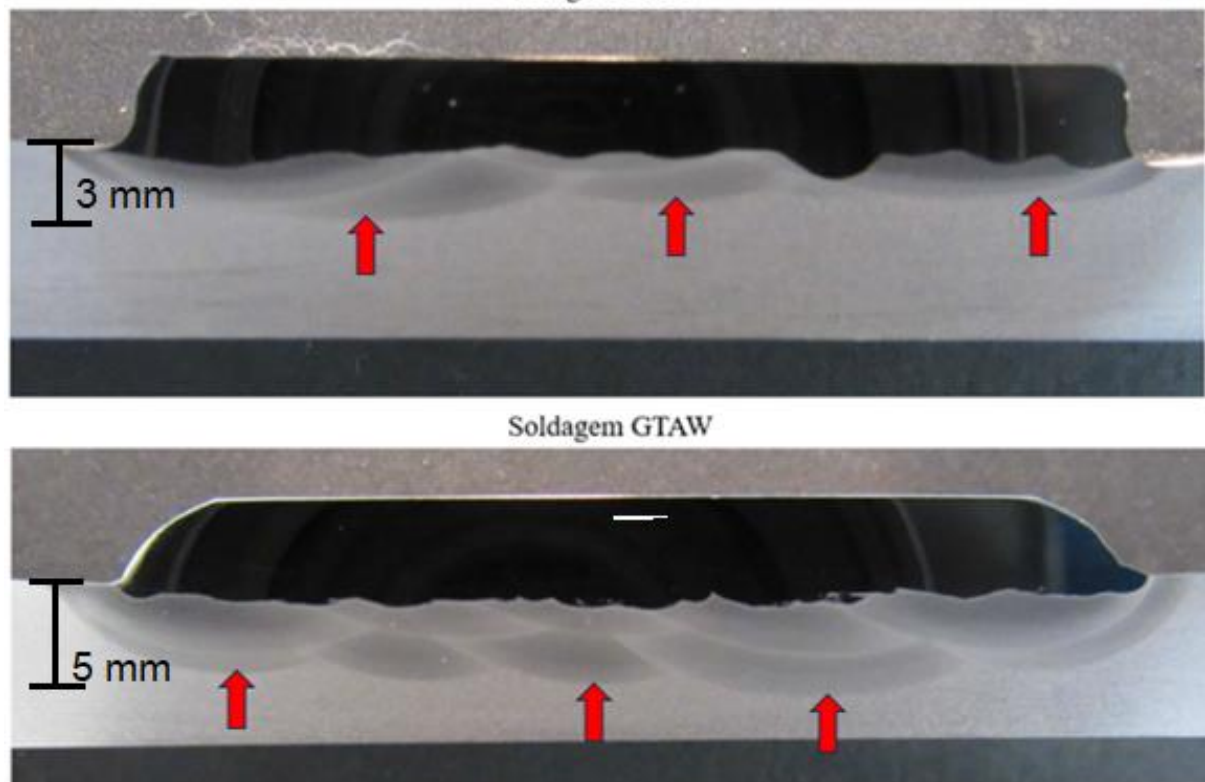
Por sua vez o processo GMAW, apresentou resultados satisfatórios no ensaio, sendo aprovado conforme os critérios da ASME IX, sugerindo boa aderência, com baixa presença de descontinuidades internas.

4.1.4 Análise macrográfica

Foi possível verificar, a partir da análise macrográfica, a presença de zonas termicamente afetadas, conforme a Figura 12.

Essas regiões afetadas pela temperatura de soldagem, sinalizadas pelas setas, podem colaborar com o processo de endurecimento e consequente temperabilidade do aço, tornando-o menos dúctil, favorecendo a presença de defeitos no material base. Os defeitos podem ser trincas, rupturas e até mesmo falta de fusão.

Figura 12 – Análise macrográfica.
Soldagem GMAW



Fonte: O autor.

Para a análise de energia empregada sobre o processo de soldagem, levou-se em consideração a corrente, a tensão e a velocidade de aplicação (Equação 4). De acordo com as ZTA's e a energia de soldagem, a solda GTAW foi submetida a maior energia (H) no processo. Os resultados estão exemplificados na Figura 13.

$$\text{Energia de soldagem (H)} = \frac{V * I * 60}{v} \quad (4)$$

Onde:

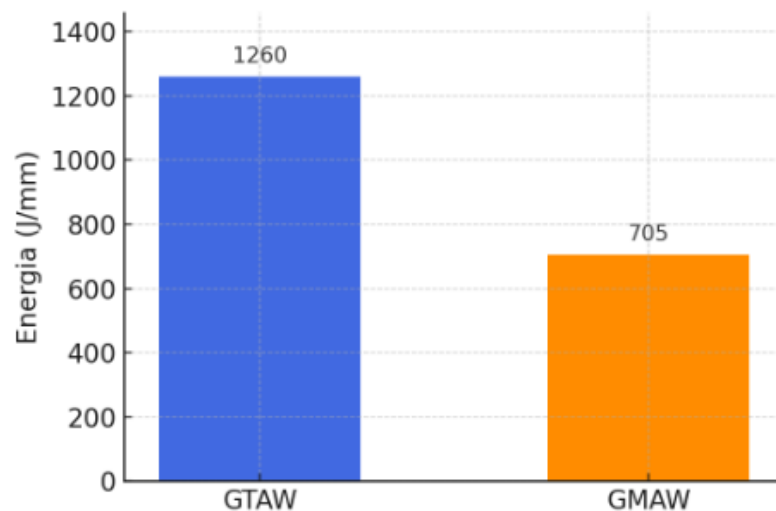
H = Energia de Soldagem (J/mm);

V = Tensão de Soldagem (V);

I = Corrente de Soldagem (A);

v = velocidade de soldagem (cm/min).

Figura 13 – Energia empregada nos processos de soldagem.



Fonte: o autor.

A energia empregada para o processo de soldagem GTAW foi maior, e é caracterizada visualmente através da ZTA no ensaio de metalografia. Como consequência do aquecimento, ocorreu o aumento de dureza e maiores níveis de diluição, favorecendo o endurecimento do metal da zona termicamente afetada, e a precipitação de fases intermetálicas frágeis com baixa tenacidade.

Na soldagem GTAW é possível verificar maior presença de regiões termicamente afetadas, bem como maiores dimensões destas, as quais podem ser indicativos de maior probabilidade de incidência de defeitos. Isso, por sua vez, pode ser verificado no ensaio de dobramento, ao qual apresentou maiores defeitos se comparado ao processo GMAW.

Através dos cálculos de diluição da solda, baseados nas Equações 5 e 6, foi possível constatar uma maior diluição para o processo GTAW, sendo ela de 33%, colaborando para a maior concentração de ferro e carbono no revestimento e, comparado ao processo GMAW, que atingiu um valor de 25% de diluição.

$$D = \frac{A_f}{A_s} \quad (5)$$

Onde:

D = Diluição (%);

A_f = Área da zona de fusão (mm);

A_s = Área do metal de solda (mm).

$$A_f = A_s - A_{md} \quad (6)$$

Onde:

A_f = Área da zona de fusão (mm);

A_s = Área do metal da solda (mm);

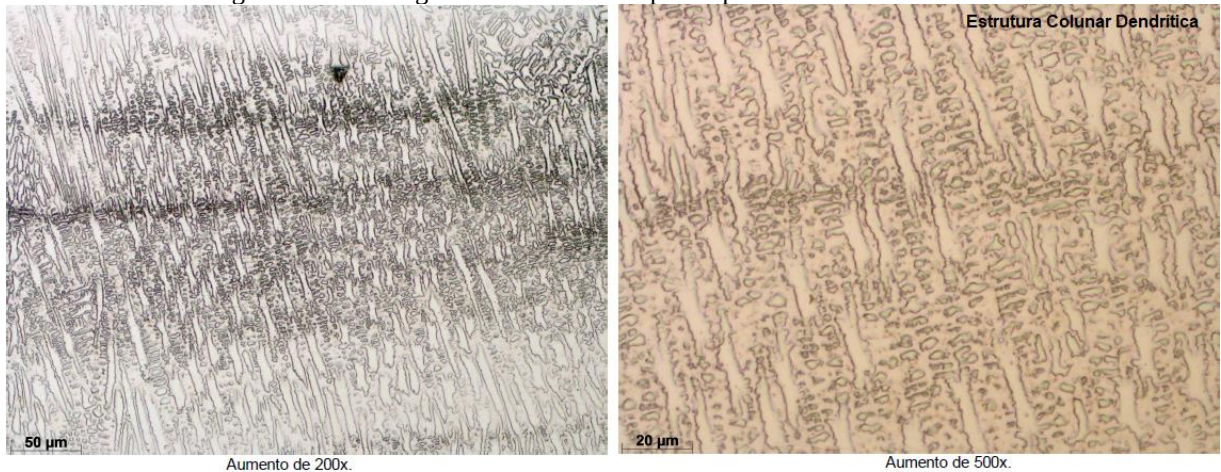
A_{md} = Área do metal depositado (mm).

Com os valores de diluição encontrados para o processo de soldagem GTAW, obteve-se um revestimento com maior concentração de carbono e ferro admitidos do material base, em comparação ao processo GMAW. A alta concentração desses elementos acaba fragilizando o revestimento e tornando-o menos resistente a corrosão.

4.1.5 Análise metalográfica

Através da análise metalográfica do revestimento depositado pelo processo de solda GMAW, foi possível verificar a microestrutura colunar dendrítica, característica do Inconel 625. Porém, a microestrutura apresentou espaçamento entre os grãos, que é caracterizado pela presença de fases secundárias interdendríticas como carbeto, formados pelos elementos Nb e/ou Mo durante a rápida solidificação, característica do processo de soldagem GMAW, conforme a Figura 14. A orientação da microestrutura dendrítica indica boa aderência ao metal base, devido ao crescimento colunar a partir da interface, com boa fusão do revestimento no metal base.

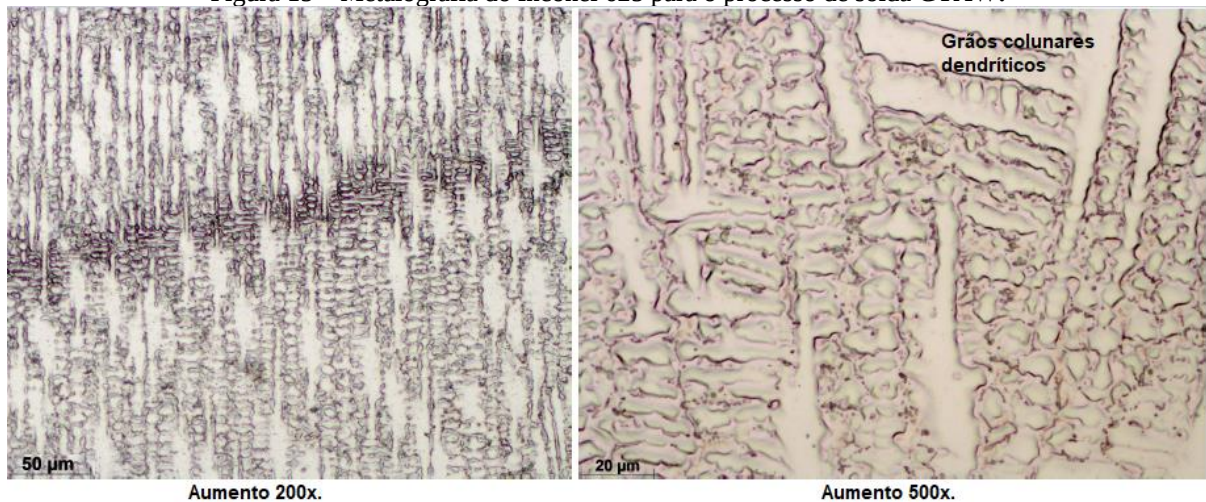
Figura 14 – Metalografia do Inconel 625 para o processo de solda GMAW.



Fonte: o autor.

Nas análises metalográficas do processo de solda GTAW, ilustradas pela Figura 15, observa-se, também, a estrutura colunar dendrítica, típica do processo de solda em questão, e a ausência de espaçamentos, ou seja, a continuidade dos grãos dendríticos.

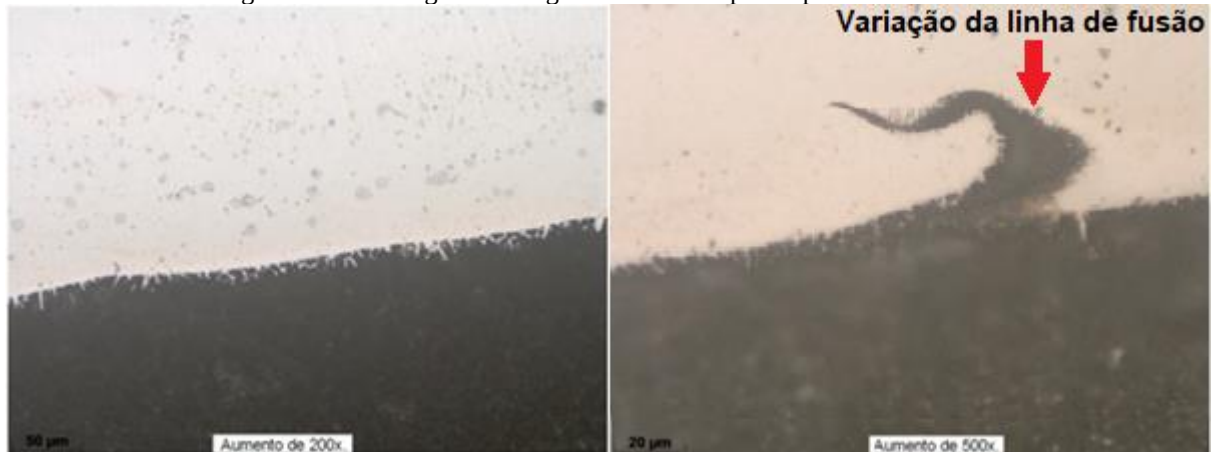
Figura 15 – Metalografia do Inconel 625 para o processo de solda GTAW.



Fonte: o autor.

Também foi realizado ensaio de micrografia nas regiões de interface dos revestimentos, onde foi possível observar boa fusão da solda. Foi constatada a presença de uma variação na linha de fusão no processo de soldagem GMAW, caracterizada pela agitação do arco elétrico na poça de fusão, chamada de ilha no metal base. Trata-se de uma região de fusão não homogênea durante a solidificação e não afetou os demais ensaios. É possível verificar a variação da linha de fusão na Figura 16.

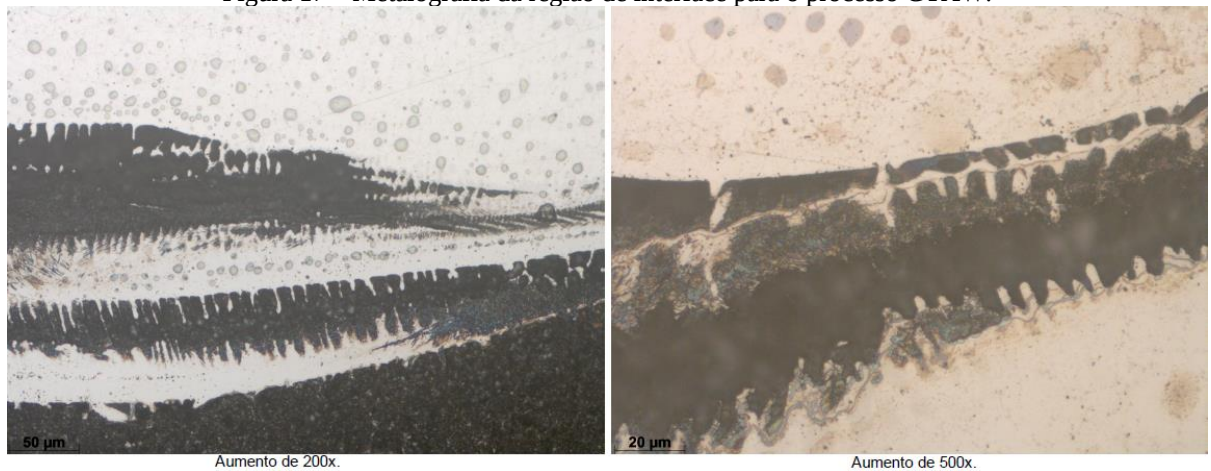
Figura 16 – Metalografia da região de interface para o processo GMAW.



Fonte: o autor.

Para o processo de soldagem GTAW (Figura 17), a diluição entre o aço base e o Inconel 625 foi elevada, apresentando alta penetração e mistura na região de interface, com ausência de descontinuidades na fusão da solda.

Figura 17 – Metalografia da região de interface para o processo GTAW.



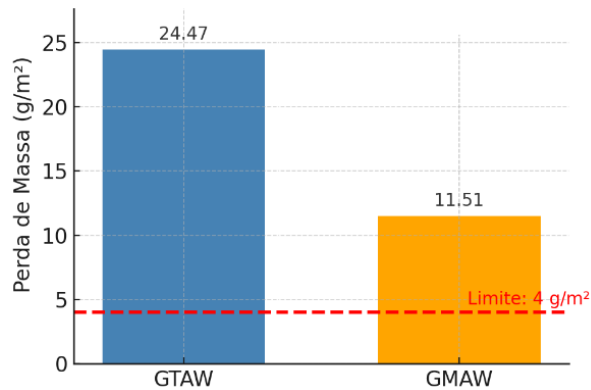
Fonte: o autor.

Ambos os processos de deposição demonstram estrutura dendrítica colunar, com crescimento a partir da zona de interface, metalografia característica do material Inconel 625.

4.1.6 Ensaio de corrosão

Com o ensaio de corrosão, foi possível observar valores acima do especificado de perda de massa para o material Inconel 625, tornando-o assim, ineficaz contra a corrosão. Os resultados (Figura 18) se devem ao fato de, na diluição dos processos de soldagem, ter havido a transferência do elemento ferro para o Inconel 625.

Figura 18 – Resultados do ensaio de corrosão (ASTM G48).



Fonte: o autor.

Como o metal base se trata de um material com alta concentração de carbono e ferro, levando em consideração a temperatura atingida pelo processo GTAW e o maior índice de diluição, ocorreu a migração desses elementos para o revestimento, diminuindo, assim, o percentual de cromo e levando à ineficiência do Inconel 625 na resistência à corrosão.

No caso do processo GMAW, apesar da composição química estar dentro dos limites especificados, o valor de diluição calculado ultrapassou o tolerado, o que indica a presença de elementos intermetálicos nos contornos de grão, fator que também compromete a eficiência do Inconel 625 quanto à resistência à corrosão.

4.2 TEMPO DE OPERAÇÃO

Através de cronometragem, para executar o revestimento da chapa de 30 cm de comprimento com camada de 6 mm, contando o tempo de resfriamento das amostras, obteve-se o tempo de 58 minutos para o processo de soldagem GTAW e 36 minutos para o processo GMAW.

É possível verificar que a soldagem GMAW é mais célere, tornando-se, assim, mais viável em tempo de operação, com velocidade de aplicação superior ao processo GTAW.

4.3 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Para execução de solda em peças de diâmetros menores, o processo de soldagem GMAW se sobressai por ser um processo de alimentação de arame de forma automática. Desta forma, só requer espaço para a tocha, e pode ser realizada em diversas posições. Considera-se, portanto, que o GMAW é um processo mais rápido e versátil.

Já na soldagem GTAW padrão, com alimentação do consumível de forma manual, espaços reduzidos podem ser um problema pelo consumível ser em varetas, tornando-se necessário chegar até o local da aplicação com a tocha e o consumível, tornando a solda em peças com menores diâmetros um processo com maior dificuldade. Assim, esclarece-se que é um processo menos versátil, mais delicado e mais demorado em comparação ao GMAW.

Foi realizado, também, levantamento do custo de operação, levando em consideração o consumo e valor dos consumíveis de soldagem. É possível verificar o levantamento na Tabela 4.

Tabela 4 – Custo dos consumíveis em relação ao consumo.

Tipo de consumível	Consumo	Valor de Compra	Valor gasto
Vareta GTAW	0,640 Kg	R\$ 27,50 / Kg	R\$ 17,60
Arame GMAW	0,980 Kg	R\$ 19,3 / Kg	R\$ 18,91
Gás GTAW	11 L/mim	R\$ 7,16 / m ³	R\$ 2,51
Gás GMAW	13 L/mim	R\$ 28,68 / m ³	R\$ 6,31

Fonte: o autor.

Para o cálculo do custo dos consumíveis da aplicação do revestimento pelos processos de soldagem, considerou-se que a aplicação do Inconel 625 foi executada em chapas de mesma área e de mesma espessura de revestimento. Obteve-se o valor de R\$ 25,22 para o processo GMAW e R\$ 20,11 para o GTAW, com consumo de eletrodo de 0,980 Kg e 0,640 Kg, respectivamente.

A diferença no peso consumido se deve ao fato do arame para a soldagem GMAW ser de menor espessura, assim necessitando mais quantidade de material em cada passe, já o arame utilizado no processo GTAW, é de maior espessura e necessita menos material por passe.

Porém, apesar do maior custo de consumíveis, o processo GMAW apresenta maior versatilidade devido à possibilidade de solda em diversas posições, ao tempo de operação ser inferior, e à facilidade de operação, por ser um processo que demanda menos habilidade do soldador.

5 CONCLUSÕES

Em relação à análise da qualidade dos processos de soldagem, analisada pela dureza, ausência de descontinuidades da solda, fusão e aderência do revestimento ao metal base, pode-se concluir que o processo GMAW demonstrou excelente desempenho nos resultados, apresentando baixa diluição do processo, com análises químicas dentro de especificado para a liga de Inconel 625, mesmo nas regiões mais próximas ao revestimento, enquanto que o processo GTAW apresentou maior diluição do processo, o que ocasionou maior concentração do elemento ferro em sua composição.

A análise de dureza no metal base não apresentou alterações significativas entre os dois processos. No metal de revestimento, a dureza foi mais elevada no processo GMAW. Houve um aumento significativo de dureza na região de interface em ambos os processos e, no processo GTAW, a dureza da região de interface ultrapassou a do revestimento. Desta forma, foi possível perceber uma região de maior aquecimento, calculada pela energia de soldagem, se comparado ao processo GMAW.

Apesar do rompimento total observado em um dos corpos de prova da soldagem pelo processo GTAW, a avaliação da integridade da solda revelou desempenho satisfatório em ambos os procedimentos analisados. A fratura localizada indica a presença de uma descontinuidade pontual, atribuída à presença de uma microtrinca.

A fusão do material aplicado foi uniforme em toda a superfície do metal base para ambos os processos. A região termicamente afetada pelos processos de soldagem foi maior no processo GTAW, por ter ocorrido maior aquecimento dos corpos de prova na deposição do revestimento.

Foi possível identificar boa aderência e fusão do revestimento ao metal base em ambos os processos de soldagem, através dos ensaios de dobramento e metalografias. No processo GTAW foi identificada uma mistura heterogênea na região de interface, enquanto que, no processo GMAW, a transição de microestruturas apresentou maior continuidade.

Em relação ao tempo de operação, foi possível verificar que a soldagem GMAW é um processo mais célere, tornando-se, assim, mais viável em tempo de operação que o processo GTAW.

Já em relação à viabilidade técnica e econômica, tendo em consideração a realização da solda em peças de diâmetros menores e em locais de difícil acesso, o consumo de gás, o consumo de arame e o valor deles, o processo de soldagem GMAW apresentou-se mais vantajoso, mesmo que a um custo pouco mais elevado de consumíveis, pela alimentação de

arame de forma automática, o que permite a operação de peças de dimensões menores e em menor tempo.

Por fim, pode-se concluir que, para os parâmetros estabelecidos no presente estudo, o processo GMAW apresenta melhor desempenho nos parâmetros de análise de qualidade, versatilidade e tempo de operação deste estudo, comparado ao processo GTAW.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação desta pesquisa, seria interessante investigar:

- a) o comportamento da propriedade da resistência à corrosão do Inconel 625 com outro material de metal base;
- b) investigar o comportamento metalúrgico do revestimento aplicado por GTAW sob condições especiais, como pré-aquecimento do substrato ou aplicação de martelamento (peening).
- c) a alteração dos parâmetros de soldagem, como a velocidade de aplicação, a corrente e tensão e a temperatura aplicadas para verificar a propriedade de resistência à corrosão.

Trabalhos futuros podem se beneficiar da aplicação desta metodologia em outros contextos, como a análise de qualidade do revestimento de Inconel 625 por solda a laser.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Specification 6D**: Specification for Valves. 25th edition: API 6D, 2021.

ARAÚJO, M. V.; ALVES, H. G.; LUNA, F. D. T.; FARIAS, S. R. N.; LIMA, A. G. B.; Escoamento Não Isotérmico de Água e Óleo em Conexão Tê na Presença de Vazamento. **8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**, Curitiba, out. 2015.

ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators**. 25ª ed.: ASME IX, 2023.

ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals**. 23ª ed.: ASME II, 2023 – Part. C.

AUGUSTO, S. N. **Simulação de escoamento multifásico em riser através de um modelo mecanicista**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Santa Cecília, Santos, 2017.

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 9788536519746.

BANOVIC, S. W.; DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. Dilution and microsegregation in dissimilar metal welds between super austenitic stainless steel and nickel base alloys. **Science and Technology of Welding and Joining**, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 374-383, dez. 2002. SAGE.

BARBEDO, N. D. **Análise das Interações das Variáveis no Processo GMAW Duplo Arame para avaliação da qualidade dos Cordões de Solda**. 2017. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

BARRA, S. R.; PEREIRA, A. S. **Descontinuidades em soldagem**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 1999.

BOSE, S. **High Temperature Coatings**. 2. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2018.

BRANDOLT, C. S. **Revestimentos de Níquel e Cobalto Aplicados por Aspersão Térmica por Chama Hipersônica (HVOF) em Aço API 5CT P110**.

CÂNGANI, A. P. M. **Análise térmica do processo de soldagem TIG de amostras metálicas**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

CARVALHO, J. F. Combustíveis fósseis e insustentabilidade. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 60, n. 3, p. 1-1, set. 2008.

CONCEIÇÃO, S. B.; LIMA, A. G. B.; ANDRADE, T. H. F.; FARIAS, S. R. N.; ANGELIM, K. C. L. Análises hidrodinâmica e energética do transporte de óleos pesados via técnica core-

flow em dutos curvados. **8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**, Curitiba, out. 2015.

GOMES, B. F. **Estudo da soldagem de revestimento a laser em tubo de AISI 4130 empregando pó de Inconel 625**. 2016. 67 f. Trabalho de conclusão de graduação - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro.

JUNIOR, C. P. F. **Estudo do revestimento por soldagem de Inconel 625® sobre aço com 9% Ni**.

KAH, Paul; VIMALRAJ, Cyril; MARTIKAINEN, Jukka; SUORANTA, Raimo. Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation. **International Journal Of Mechanical And Materials Engineering**, [S.L.], 11 jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC.

KEJELIN, N. Z. **Soldagem de revestimento de aços comuns C-Mn com superliga a base de níquel Inconel 625**. 2012. 219 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2021.

KUMAR, S. P., ELANGO VAN, S., MOHANRAJ, R., RAMAKRISHNA, J.R. **A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition**.

ŁATKA, L.; PAWŁOWSKI, L.; WINNICKI, M.; SOKOŁOWSKI, P.; MAŁACHOWSKA, A.; KOZERSKI, S. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 10, n. 15, p. 5153, 27 jul. 2020. MDPI AG.

LIMA, M. F. C.; SILVA, M. A. Inovação em petróleo e gás no Brasil: a parceria CENPES-Petrobras e COPPE-UFRJ. **Sociedade e Estado**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 97-115, abr. 2012. FapUNIFESP (SciELO).

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MENDES, A. P. A.; TEIXEIRA, C. A. N.; ROCIO, M. A. R. Petróleo e Gás. In: PUGA, Fernando Pimentel; CASTRO, Lavínia Barros de (Org.). **Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta**. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018. p. 53-88.

MICROMAZZA Indústria de Válvulas LTDA. **Eleita Como Melhor Fornecedor Petrobras em 2018 – 2019 – 2022**. 2022.

MIRANDA, E. C.; SILVA, C. C.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P. Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 180-190, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO).

MODENESI, P. J. A química da formação do cordão na soldagem TIG. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 287-300, set. 2013. FapUNIFESP (SciELO).

NEVES, R. B.; PEREIRA, V.; COSTA, H. G. Auxílio multicritério à decisão aplicado ao planejamento e gestão na indústria de petróleo e gás. **Production**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 43-53, 3 set. 2013. FapUNIFESP (SciELO).

O'BRIEN, A. (ed.). **Welding Handbook: Welding Processes, Part 1**. 9. ed. Miami: American Welding Society, 2004. 680 p.

OLIVEIRA, M. M.; COUTO, A. A.; ALMEIDA, G. F. C.; REIS, D. A. P.; LIMA, N. B.; BALDAN, R. Mechanical Behavior of Inconel 625 at Elevated Temperatures. **Metals**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 301, 7 mar. 2019. MDPI AG.

PESSOA, E. F. **Soldagem de revestimento com ligas de níquel empregando o processo MIG/MAG com duplo arame para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural**. 2014. 217 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

QUEIROZ, P. R. O. **Influência da energia de soldagem e do tectimento sobre a geometria do cordão de solda na soldagem de revestimento**. 2021. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba.

REPÓRTER ADVFN (Brasil). Vale revisa projeções para produção de minério de ferro e níquel, ações sobem. **Advanced Financial Network**. Brasil, 11 set. 2024.

RODRIGUES, C. R.; CERSOSIMO, A. G. **Soldagem na Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022. 901 p.

SANTOS, A. X.; MACIEL, T. M.; SANTANA, R. A. C. Avaliação de Revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do Processo de Soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 128, 30 ago. 2015. SBV Sociedade Brasileira de Vácuo.

SCHWEDERSKY, M. B.; DUTRA, J. C.; OKUYAMA, M. P.; SILVA, R. H. G. 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, p. 333-340, dez. 2011. FapUNIFESP (SciELO).

SHANKAR, V.; RAO, K B. S.; MANNAN, S. L. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. **Journal Of Nuclear Materials**, [S.L.], v. 288, n. 2-3, p. 222-232, fev. 2001. Elsevier BV.

SILVA, C. C.; AFONSO, C. R. M.; RAMIREZ, A. J.; MOTTA, M. F.; MIRANDA, H. C.; FARIAS, J. P. Aspectos metalúrgicos de revestimentos dissimilares com a superliga à base de níquel inconel 625. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 251-263, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO).

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 218-228, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO).