



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

LUCAS OLIVEIRA SIQUEIRA

**BRASAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM METAIS DE ADIÇÃO À
BASE DE PRATA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS PRESSURIZADOS DE
AERONAVES**

Recife
2021

LUCAS OLIVEIRA SIQUEIRA

**BRASAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM METAIS DE ADIÇÃO À
BASE DE PRATA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS PRESSURIZADOS DE
AERONAVES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (REDE) do Centro de Tecnologias e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais.

Área de concentração: Ciências e Tecnologias Aeroespaciais

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.

Coorientadora: Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222
S618b Siqueira, Lucas Oliveira.

Brasagem de aço inoxidável austenítico com metais de adição à base de prata para aplicação em sistemas pressurizados de aeronaves / Lucas Oliveira Siqueira.
108 f.; figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos.
Coorientadora: Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós Graduação em Engenharia Aeroespacial (REDE), Recife, 2021.
Inclui referências.

1. Engenharia Aeroespacial. 2. Brasagem por tocha Oxiacetilênica. 3. Aço inoxidável Austenítico. 4. Metal de adição à base de prata. 5. Óxido de grafeno. 6. Avaliação microestrutural. 7. Propriedades mecânicas. I. Santos, Tiago Felipe de Abreu (Orientador). II. Lima, Nathalia Bezerra de (Coorientadora). III. Título.

UFPE

629.1 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 117

LUCAS OLIVEIRA SIQUEIRA

**BRASAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO COM METAIS DE ADIÇÃO À
BASE DE PRATA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS PRESSURIZADOS DE
AERONAVES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (REDE), Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Aeroespaciais.

Aprovado em: 23/08/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Nathalia Bezerra de Lima (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Severino Leopoldino Urtiga Filho
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Sergio de Traglia Amancio Filho
Graz University of Technology, Áustria

Dedico esse trabalho aos meus pais, Luiza e Antônio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiza e Antônio, por sempre me apoiarem, incentivarem e acreditarem em mim.

A minha namorada, Maria Victória, por me apoiar e dar forças para seguir em frente sem desistir.

Ao meu amigo Josean Júnior, pelos ótimos momentos de amizade dentro e fora da universidade.

Ao meu Orientador, Dr. Tiago Felipe de Abreu Santos, por todo o apoio, paciência e ensinamentos ao longo dessa jornada tortuosa que foi o mestrado.

A minha Coorientadora, Dra. Nathália Bezerra de Lima, pelo suporte essencial na finalização deste trabalho.

A todos da família SOLDAMAT, pelo apoio, amizade e me receberem de braços abertos. Agradeço especialmente ao soldadelics: Ana Carla, Ivan Picchi e Igor Jordão pelo suporte técnico e psicológico.

A todos os colegas do INTM, em nome de Ronildo e Filipe, que ajudaram direta ou indiretamente na realização desse trabalho.

A todos os técnicos do INTM, em especial Rubens, Janaína e Walter, pela disponibilidade, ensinamentos e realização de experimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA – UFPE) da Rede Nordeste Aeroespacial pela oportunidade e suporte.

A Universidade Federal do Piauí (UFPI), em nome de Renan Matos, pela disponibilidade e execução de ensaios de difração de raios-x.

À CAPES, CNPq e FACEPE pelo apoio financeiro e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo ambiente fornecido para realização desse trabalho.

Agradeço ao INTM e aos apoios deste recebido, ANP e FINEP, pela disponibilização de espaço físico e equipamentos necessários para realização deste trabalho.

A todos que, mesmo não sendo nominalmente citados, contribuíram de alguma forma com a realização desse trabalho.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?”. (Sir Isaac Newton).

RESUMO

Atualmente o transporte de passageiros em aviões comerciais civis é uma das formas mais comuns e recorrentes para se percorrer longas distâncias. No entanto, essa atividade é realizada em altas altitudes, situação na qual a quantidade de oxigênio disponível no ar se torna insuficiente para a manutenção da ação humana. A partir disso, as aeronaves são equipadas com sistemas de alimentação de oxigênio para suprir as necessidades desse gás requerida pelos pulmões. As tubulações de alta pressão desse sistema são fabricadas em aço inoxidável e comumente unidas por brasagem usando metais de adição à base de prata, porém os estudos na literatura acerca dessa união são bastante escassos. Nesse contexto, essa pesquisa tem o objetivo de contribuir a literatura fornecendo informações microestruturais e mecânicas relevantes acerca da união do aço inoxidável 304 por brasagem com tocha oxiacetilênica usando metais à base de prata com conteúdo de prata de 25%, 35% e 45%. Além disso, é proposto um novo metal de adição com conteúdo de prata de 25% com adição de óxido de grafeno. A inspeção visual das juntas brasadas indicaram que a preparação superficial afeta bastante a formação de trincas e poros na região do metal de adição. O ensaio relativo ao tipo de chama confirmou que a chama do tipo neutra é mais indicada para brasagem de aços inoxidáveis usando metal de adição à base de prata, fornecendo maior preenchimento da junta brasada. A análise microestrutural revelou que a junta brasada com a adição de óxido de grafeno apresentou uma microestrutura mais homogênea e refinada em relação a condição sem adição de óxido de grafeno. Além de que, foi verificada uma heterogeneidade microestrutural nas juntas brasadas com 25% e 35% de prata. Os ensaios de microdureza Vickers mostraram-se de acordo com as análises microestruturais, onde a junta brasada com óxido de grafeno apresentou uma dureza levemente maior em relação a todas as outras condições de metal de adição devido à microestrutura refinada. Nos ensaios de cisalhamento, foi observado divergência com a literatura, onde o valor de resistência mecânica tendeu a aumentou com o acréscimo do teor de prata no metal de adição. A junta 25 Ag GO apresentou melhor desempenho médio.

Palavras-chave: Brasagem por tocha Oxiacetilênica; Aço inoxidável Austenítico; Metal de adição à base de prata; Óxido de grafeno; Avaliação microestrutural; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Currently, the transport of passengers on civil commercial aircraft is one of the most common and recurrent ways to travel long distances. However, this activity is carried out at high altitudes, a situation in which the amount of oxygen available in the air becomes insufficient for the maintenance of human action. From there, the aircraft are equipped with oxygen feed systems to supply the needs of this gas required by the lungs. The high-pressure pipes of this system are manufactured in stainless steel and commonly joined by brazing using silver-based filler metals, but studies in the literature about this joining are quite scarce. In this context, this research aims to contribute to the literature by providing relevant microstructural and mechanical information about the joining of 304 stainless steel by brazing with an oxyacetylene torch using silver-based metals with silver content of 25%, 35% and 45%. Furthermore, a new filler metal with silver content of 25% with addition of graphene oxide is proposed. Visual inspection of the brazed joints indicated that surface preparation greatly affects the formation of cracks and pores in the filler metal region. The flame type test confirmed that the neutral type flame is best suited for brazing stainless steels using silver-based filler metal, providing a greater degree of fill of the brazed joint. The microstructural analysis revealed that the brazed joint with the addition of graphene oxide presented a more homogeneous and refined microstructure compared to the condition without addition of graphene oxide. Furthermore, a microstructural heterogeneity was verified in the brazed joints with 25% and 35% of silver. The Vickers microhardness tests were in agreement with the microstructural analyses, where the graphene oxide brazed joint presented a slightly higher hardness compared to all other filler metal conditions due to the refined microstructure. In the shear tests, a divergence with the literature was observed, where the value of mechanical strength tended to increase with the addition of silver content in the filler metal. The 25 Ag GO joint had the best average performance.

Keywords: Oxyacetylene torch brazing; Silver-based filler metal; Stainless steel; Graphene oxide; Microstructural evaluation; Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de distribuição de oxigênio por demanda na cabine do piloto.....	21
Figura 2 - Composições e propriedades das famílias de ligas de aços inoxidáveis. .	23
Figura 3 - Esquema do processo de brasagem por tocha oxiacetilênica manual.....	34
Figura 4 - Diagrama binário Ag-Cu.....	39
Figura 5 - Tipos de juntas mais usadas para chapas e tubos.	45
Figura 6 - Efeito do espaçamento da junta na resistência mecânica.	46
Figura 7 - Fluxograma do procedimento experimental usado no estudo.....	51
Figura 8 - Detalhes do sistema usado para brasagem: (a) Arranjo experimental do processo; (b) Materiais auxiliares usados na brasagem; e (c) Porta-amostras.....	54
Figura 9 - Microscópio óptico utilizado acoplado com câmera digital.....	58
Figura 10 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado.	59
Figura 11 - Equipamento utilizado para análise de difração de raios-X.	60
Figura 12 - Projeto do corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento.	60
Figura 13 - Equipamento utilizado para realização do ensaio resistência ao cisalhamento.....	61
Figura 14 - Equipamento utilizado para medições de microdureza Vickers.	62
Figura 15 - Esquema para realização do mapa de microdureza.....	62
Figura 16 - Micrografias dos metais de adição contendo 25%, 35% e 45% Ag como recebido obtidas por MO.....	63
Figura 17 - Micrografias dos metais de adição contendo 25%, 35% e 45% Ag como recebido obtidas por MEV.....	64
Figura 18 - Micrografias indicando os pontos de análise por EDS para cada um dos metais de adição e seus respectivos espectros.....	65
Figura 19 - Valores de microdureza Vickers para cada metal de adição como recebido.....	66
Figura 20 - Topo das juntas imediatamente após a brasagem para diferentes tipos de chama: (a) Oxidante; (b) Carborizante e (c) Neutra.....	67
Figura 21 - Topo e raiz das juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza para diferentes tipos de chama.....	68
Figura 22 - Macrografias das juntas brasadas para diferentes tipos de chama.	69

Figura 23 - Juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza (ensaios preliminares): (a) 25% Ag; (b) 35% Ag e (c) 45% Ag.....	70
Figura 24 - Macrografias da seção transversal das juntas brasadas (ensaios preliminares).	71
Figura 25 - Comparativo da porcentagem de poros para cada condição de metal de adição utilizada (ensaios preliminares).	72
Figura 26 - Juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza (ensaios definitivos): (a) 25% com GO; (b) 25% Ag; (c) 35% Ag e (d) 45% Ag. ...	73
Figura 27 - Macrografias da seção transversal das juntas brasadas (ensaios definitivos).	74
Figura 28 - Comparativo da porcentagem de poros para cada condição de metal de adição utilizada (ensaios definitivos).	75
Figura 29 - Difratogramas de raios-X do grafite e do óxido de grafeno.	76
Figura 30 - Espectros de DRX obtidos das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag.	77
Figura 31 - Micrografias do centro e interface das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag.	78
Figura 32 - Micrografias das diferentes regiões (superior, central e inferior) da junta brasada 25 Ag.	80
Figura 33 - Micrografias das diferentes regiões (superior, central e inferior) da junta brasada 35 Ag.	81
Figura 34 - Porcentagem de variação da fase prata na região superior, central e inferior das juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag.	82
Figura 35 - Micrografias apresentando a comparação microestrutural entre as juntas com 25% Ag e 25% Ag GO na região superior, central e inferior.	83
Figura 36 - Micrografias obtidas por MEV usando BSE das juntas brasadas: (a) 25 Ag; (b) 25 Ag GO; (c) 35 Ag e (d) 45 Ag.	84
Figura 37 - Projeção <i>liquidus</i> do diagrama ternário Ag-Cu-Zn com os pontos dos metais de adição com 25%, 35% e 45% Ag.	85
Figura 38 - Micrografias obtidas por MEV da junta brasada 25 Ag GO: (a) Vista geral e (b) Detalhe magnificado da figura (a).	86
Figura 39 - Mapas elementais obtidos por EDS da região com fase de agulhas da junta brasada 25 Ag GO.	87

Figura 40 - Micrografias obtidas por MEV da junta brasada 45 Ag: (a) Vista geral e (b) Detalhe magnificado da figura (a).	88
Figura 41 - Micrografia das juntas brasadas indicando a presença de penetração intergranular de elementos do metal de adição no metal de base: (a) 25 Ag (b) 25 Ag GO; (c) 35 Ag e (d) 45 Ag.....	89
Figura 42 - Mapas elementais obtidos por EDS da interface da junta brasada 25 Ag GO.....	89
Figura 43 - Micrografias indicando os pontos de análise por EDS para as juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag e seus respectivos espectros.	91
Figura 44 - Micrografia indicando os pontos de análise por EDS para a junta brasada 45 Ag e seus respectivos espectros.	92
Figura 45 - Curvas de DSC e derivada para cada metal de adição: (a) 25%; (b) 35% e (c) 45% Ag.....	94
Figura 46 - Mapa de microdureza Vickers das juntas brasadas para as quatro condições de metal de adição utilizadas.	96
Figura 47 - Dados quantitativos de microdureza para cada condição de junta brasada.....	97
Figura 48 - Resistência ao cisalhamento das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável 304 à temperatura ambiente.....	31
Tabela 2 - Tipos de chama mais utilizados na brasagem por tocha.....	37
Tabela 3 - Características dos metais de adição usados para brasagem de aços inoxidáveis.....	40
Tabela 4 - Composição química de metais de adição à base de prata de acordo com a AWS.	41
Tabela 5 - Características dos principais fluxos para brasagem de acordo com a AWS.	44
Tabela 6 - Composição química do aço inoxidável 304.	52
Tabela 7 - Composição química e intervalo de fusão dos metais de adição à base de prata.	52
Tabela 8 - Características do fluxo para brasagem com metais de adição à base de prata.	53
Tabela 9 - Parâmetros do processo de brasagem.	57
Tabela 10 - Parâmetros para o teste do tipo de chama.	57
Tabela 11 - Dados quantitativos obtidos na análise química e as possíveis fases para os espectros nos metais de adição 25%, 35% e 45% Ag.....	65
Tabela 12 - Dados quantitativos obtidos na análise química e as possíveis fases para os espectros nas juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag.....	91
Tabela 13 - Dados quantitativos obtidos na análise química e as possíveis fases para os espectros para a junta brasada 45 Ag.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
AHSS	<i>Advanced High Strength Steels</i> (Aços Avançados de Alta Resistência)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldagem)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Ensaaios e Materiais)
BSE	<i>Backscattered Electrons</i> (Elétrons Retroespalhados)
CCC	Cúbico de corpo centrado
CFC	Cúbico de face centrada
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
DRX	Difração de Raios-X
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> (Calorimetria de Varredura Diferencial)
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia por Energia Dispersiva)
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> (Administração Federal de Aviação)
UE	União Européia
EUA	Estados Unidos da América
GO	Óxido de Grafeno
HV	Dureza Vickers
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
SS	<i>Stainless Steel</i> (Aço Inoxidável)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	SISTEMAS PRESSURIZADOS EM AERONAVES	20
3.2	AÇOS INOXIDÁVEIS	22
3.3	AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	26
3.3.1	Aspectos Gerais dos Aços Inoxidáveis Austeníticos	26
3.3.2	Classificação dos Aços Inoxidáveis Austeníticos	27
3.3.3	Propriedades Físicas e Mecânicas	28
3.3.4	Braseabilidade	29
3.4	PROCESSO DE BRASAGEM	30
3.4.1	Aspectos Gerais da Brasagem	30
3.4.2	Molhabilidade e Capilaridade	32
3.4.3	Brasagem por Tocha Oxiacetilênica	33
3.5	METAIS DE ADIÇÃO	36
3.5.1	Metais de Adição à Base de Prata	38
3.5.2	Fluxos de Brasagem	41
3.5.3	Projeto da Junta	43
3.6	BRASAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS USANDO METAIS DE ADIÇÃO À BASE DE PRATA	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1	METAL DE BASE	51
4.2	METAIS DE ADIÇÃO	51
4.3	FLUXO	51
4.4	FABRICAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS COM ÓXIDO DE GRAFENO	52
4.5	CALORIMETRIA DE VARREDURA DIFERENCIAL	52
4.6	PROCESSO DE BRASAGEM	53
4.6.1	Equipamentos e Layout do Processo	53
4.6.2	Procedimento de Brasagem	54
4.6.3	CONDIÇÕES DE BRASAGEM	55

4.7	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA JUNTA BRASADA.....	56
4.7.1	Preparação das Amostras	56
4.7.2	Microscopia Óptica	57
4.7.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	58
4.7.4	Difração de Raios-X.....	58
4.8	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA JUNTA BRASADA.....	59
4.8.1	Ensaio de Resistência ao cisalhamento.....	59
4.8.2	Ensaio de Microdureza Vickers.....	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	AVALIAÇÃO DOS METAIS DE ADIÇÃO	62
5.1.1	Análise por Microscopia	62
5.1.2	Ensaio de Microdureza Vickers.....	65
5.2	INFLUÊNCIA DO TIPO DE CHAMA	66
5.3	INSPEÇÃO VISUAL DAS JUNTAS BRASADAS	69
5.3.1	Ensaio Preliminares	69
5.3.2	Ensaio Finais	71
5.4	AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS JUNTAS BRASADAS	74
5.4.1	Difração de Raios-X.....	74
5.4.2	Microscopia Óptica	78
5.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura	84
5.5	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DAS JUNTAS BRASADAS.....	94
5.5.1	Ensaio de Microdureza Vickers.....	94
5.5.2	Ensaio de resistência ao cisalhamento.....	95
6	CONCLUSÕES	99
6.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	100
	REFERÊNCIAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

O desejo do ser humano de voar é antigo, mas o feito só foi alcançado no início do século XX com a invenção do avião. Atualmente, este é um dos meios de transporte mais utilizados e seguros, quando comparado a transportes terrestres. O avião se locomove em elevadas altitudes o que permite se deslocar sem obstáculos. No entanto, esta atividade tem suas desvantagens, dentre elas a baixa disponibilidade de oxigênio. Nessas condições, o ar se torna rarefeito pela diminuição da pressão dificultando as ligações de oxigênio. Sendo assim, visando permitir a atividade humana, as aeronaves são equipadas com sistemas pressurizados de oxigênio (AEROTD, 2015a).

Os sistemas de oxigênio em aeronaves geralmente são compostos por um cilindro a alta pressão para armazenamento e por tubulações que carregam o gás por toda a aeronave. As tubulações de alta pressão eram compostas por tubulações de cobre, mas foram substituídas por aços inoxidáveis ou ligas de alumínio devido a fragilização por fadiga que ocorre naqueles materiais (INSTITUTO DE AVIAÇÃO CIVIL, 2002). Dentre os aços inoxidáveis usados, a liga 304 é a mais conhecida. Para esta aplicação, a circular consultiva AC 43.13-1B (1998) da FAA (*Federal Aviation Administration*) recomenda que a união dessas ligas de aço inoxidável seja feita usando brasagem por tocha oxiacetilênica usando metais de adição à base de prata sem cádmio.

Apesar do aço inoxidável 304 ser bastante conhecido e de uso geral, as investigações em pesquisas científicas de uniões aço inoxidável 304/aço inoxidável 304 por brasagem usando metais de adição à base de prata são muito escassas. Considerando especificamente a brasagem por tocha oxiacetilênica, são encontradas poucas referências na literatura. Nesse contexto, a maioria das pesquisas estão concentradas em uniões dissimilares com aço inoxidável e ligas de titânio ou latão.

Um outro ponto que deve ser observado é sobre o uso de metais de adição à base de prata, que são bastante utilizados para união de grande parte de materiais ferrosos e não ferrosos, produzindo juntas com boa resistência mecânica (SCHWARTZ, 2003). No entanto, o preço é um fator que dificulta a sua aplicação em larga escala. Com isso, nas últimas décadas, diversas pesquisas buscaram desenvolver uma liga reduzindo ou minimizando o teor de prata com a adição de novos elementos químicos como, por exemplo, Sn, Ga, In, Ni e Ca (ZHONGMIN *et al.*, 2010;

WINIOWSKI e RÓŻAŃSKI, 2011; SUI *et al.*, 2013; MA, XUE e WANG, 2016; WANG, LI e PENG, 2018). A ideia consistia em desenvolver ligas com menor teor de prata sem prejudicar as características vantajosas desse metal de adição.

Desse modo, o presente trabalho visa avaliar a união do aço inoxidável 304/aço inoxidável 304 usando metais de adição com diferentes teores de prata, como 25 %, 35 % e 45 %. Essa pesquisa tem por objetivo fornecer resultados relevantes para a literatura científica sobre essa aplicação, tanto do ponto de vista microestrutural quanto de desempenho mecânico, além do entendimento das alterações macroestruturais causadas por diferentes teores de Ag. Além disso, a partir do consumível com menor teor de prata, é proposto um metal de adição (25 % Ag) com a adição de óxido de grafeno GO, para um comparativo de performance com as uniões produzidas usando os outros metais de adição citados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a microestrutura e o desempenho mecânico de juntas brasadas de aço inoxidável austenítico 304 usando metais de adição à base de prata com diferentes teores de prata para aplicações em tubulações de alta pressão de oxigênio em aeronaves.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Abaixo, são listados os objetivos específicos deste trabalho:

- Analisar do efeito do tipo de chama no preenchimento do metal de adição na junta brasada;
- Produzir juntas brasadas usando metais de adição à base de prata com teores de prata de 25 %, 35 % e 45 %;
- Produzir juntas brasadas usando um metal de adição com 25 % de prata contendo óxido de grafeno (GO);
- Caracterizar os metais de adição;
- Caracterizar microestruturalmente as juntas brasadas;
- Avaliar o comportamento mecânico das juntas brasadas;
- Correlacionar parâmetros de processo, tipo de chama, microestrutura e desempenho mecânico (resistência ao cisalhamento e microdureza Vickers) de juntas brasadas em aço inoxidável austenítico 304 para aplicações em tubulações de alta pressão de oxigênio em aeronaves.

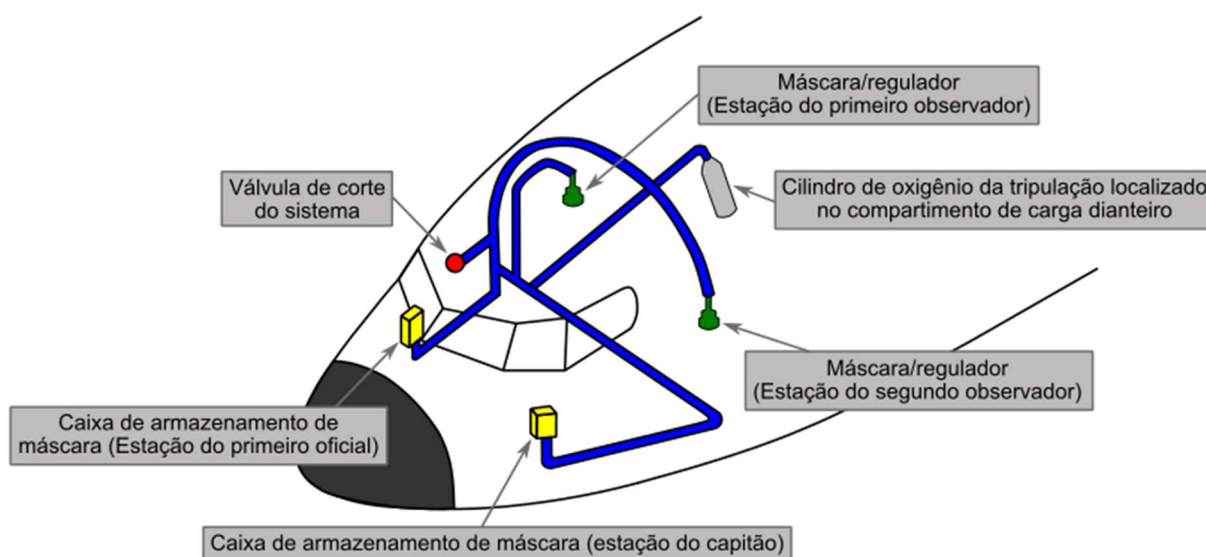
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SISTEMAS PRESSURIZADOS EM AERONAVES

Com o aumento da altitude a pressão do ar diminui e o ar se torna rarefeito, diminuindo também a quantidade de oxigênio disponível. Isso pode levar o corpo de um ser humano exposto a esse ambiente a um quadro de hipóxia que pode acarretar em sintomas como desorientação, enxaqueca, fadiga, náuseas e até mesmo a morte (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2018). Em vista disso, os sistemas de oxigênio de aeronaves têm a função de suprir a necessidade de oxigênio requerida para os pulmões, de modo a permitir uma atividade normal em altitudes de até 40.000 pés. Em algumas aeronaves, é usado um sistema de fluxo contínuo de oxigênio para a tripulação e passageiros, como acontece nas grandes aeronaves de transporte (AEROTD, 2015a).

O sistema de oxigênio é suprido a partir de um ou mais cilindros de oxigênio de baixa e alta pressão, Figura 1. A indicação da pressão nas conexões da linha está geralmente localizada entre a válvula de alívio de pressão e o cilindro. É importante ressaltar que alguns sistemas de oxigênio gasoso não utilizam válvulas de alívio de pressão, onde a redução da pressão ocorre por meio de um regulador que é localizado entre os sistemas de baixa pressão e de alta pressão (AFS-640, 1998). Existe ainda a possibilidade do oxigênio ser armazenado na forma líquida, esses sistemas têm a vantagem de economizar mais espaço, cerca de 3 vezes menor e 5 vezes mais leve. No entanto, existe como desvantagem a baixa temperatura, em torno de $-197\text{ }^{\circ}\text{C}$, necessária para manter esse gás no estado líquido (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, [s.d.]).

Figura 1 - Sistema de distribuição de oxigênio por demanda na cabine do piloto



Fonte: Reproduzido de FAA (2018).

O oxigênio pode ser armazenado sob altas pressões chegando até 1850 psi (12,6 MPa) ou sob baixas pressões chegando até 425 psi (2,9 MPa). Todo sistema de oxigênio contém um tanque de armazenamento, um sistema de regulação e um sistema de distribuição. A principal diferença entre os tipos de sistemas está na regulação do oxigênio para o usuário (AFS-300, 2008). No sistema de fluxo contínuo, por exemplo, o oxigênio é entregue de forma contínua, considerada uma grande desvantagem devido ao "desperdício" de oxigênio (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, [s.d.]).

As linhas de alta pressão estão localizadas entre o cilindro de oxigênio e o regulador de pressão e são fabricadas normalmente de tubos de aço inoxidável ou de ligas de cobre. Os acessórios das linhas de alta pressão são normalmente brasados com solda de prata (AEROTD, 2015b). Um aspecto importante é que as ligas de prata nestes sistemas devem ser livres de cádmio. O uso de cádmio na solda prata emite um gás tóxico quando fundido, o que é extremamente perigoso à saúde quando inalado (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). As linhas de baixa pressão se estendem do regulador de pressão até cada passageiro e a saída de oxigênio da tripulação (AFS-640, 1998). Estas linhas são fabricadas a partir de ligas de alumínio, cobre ou mangueiras flexíveis.

As especificações em sistemas de baixa pressão consistem no uso de tubulações de ligas de alumínio (2024-T3, 5052-O e 6061-T6) sem costura ou equivalente com diâmetro externo de 5/16" (7,9 mm) e espessura de parede de 0,035"

(0,9 mm). Na região de alta pressão do sistema de oxigênio são usadas tubulações de diâmetro externo de 3/16" (4,8 mm) e espessura de parede de 0,035" (0,9 mm). O material das tubulações de alta pressão são geralmente ligas de cobre com especificação WWT -779a tipo N ou aço inoxidável 304 ou 321 entre a válvula de enchimento e a válvula de alívio de pressão (AFS-300, 2008).

O presente trabalho de dissertação visa estudar as linhas de oxigênio de alta pressão, onde o material utilizado é normalmente o aço inoxidável 304; que embora seja objeto de diversos estudos em soldagem, a brasagem com solda prata em tubulações de transporte de oxigênio ainda é pouco explorada, permitindo uma contribuição para o estado da arte do conhecimento dentro do ecossistema aeronáutico e aeroespacial.

3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

O ferro e as ligas ferrosas, como o aço, a depender da composição podem apresentar características insatisfatórias em relação às propriedades de corrosão, uma vez que estes sistemas sofrem o processo de formação de ferrugem quando em contato com o ar atmosférico, tendo efeitos ainda maiores em atmosferas de fornos e ácidas. No entanto, existe um grupo de materiais com ligas baseadas em ferro-cromo-níquel (Fe-Cr-Ni), conhecido como aços inoxidáveis, os quais apresentam elevada resistência à corrosão mesmo sob ação de ácidos concentrados e temperaturas elevadas (LEFFLER, 2000; OUTOKUMPU STAINLESS, 2013).

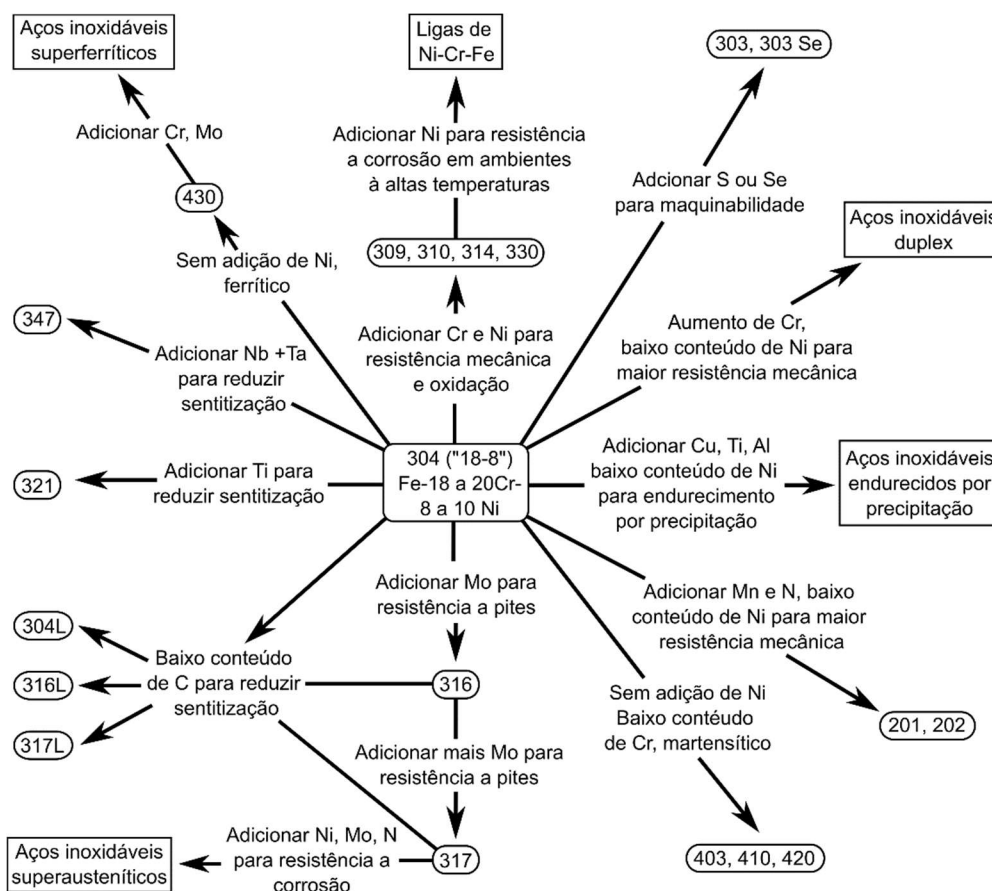
Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro com um conteúdo mínimo de cerca de 10 – 12% de Cr, que é a quantidade necessária para prevenir a formação de ferrugem em atmosferas oxidantes (CHIAVERINI, 1986; OLSON *et al.*, 1993). Esta composição permite a formação de um filme fino invisível e aderente de óxido rico em cromo. Esta camada é formada e restaurada na presença de oxigênio e ela que confere a esses materiais elevada resistência a corrosão e oxidação, uma vez que reduz a dissolução na superfície (SADEK e EL-SHEIKH, 2000; LIPPOLD e KOTECKI, 2005; PRASAD, RAO e RAO, 2014).

O cromo é um dos mais importantes elementos ligantes dos aços inoxidáveis, uma vez que ele é responsável pela boa resistência a corrosão desses materiais. O cromo promove a formação de uma estrutura ferrítica e quanto mais ele é adicionado maior será a resistência a oxidação a altas temperaturas. O níquel seria o segundo

principal ligante e tem duas funções principais: (I) estabilizar a austenita a temperatura ambiente, o que aumenta a maleabilidade e reduz a taxa de corrosão e (II) aumentar o campo gama no sistema ternário Fe-Cr-Ni à temperaturas mais elevadas (MARSHALL, 1984; BANSOD *et al.*, 2017). Além disso, o Ni pode ser usado nos aços endurecíveis por precipitação para aumentar a resistência a tração (LEFFLER, 2000).

Além do tradicional cromo e níquel nos aços inoxidáveis, visando melhorar propriedades particulares do material, também podem ser adicionados outros elementos de liga como: manganês, molibdênio, cobre, titânio, silício, nióbio, alumínio, nitrogênio, tungstênio e carbono. O carbono normalmente está presente em quantidades que vão de 0,03 % a 1,0 % em certas grades, visto que ao combinar-se com outros elementos, como o cromo, pode favorecer a corrosão (DAVIS, 2000; PADILHA e RIOS, 2002). A Figura 2 resume as composições mais comuns e propriedades associadas à família de aços inoxidáveis.

Figura 2 - Composições e propriedades das famílias de ligas de aços inoxidáveis



Fonte: Reproduzido de Davis (2000).

Os aços inoxidáveis são usados em uma ampla variedade de aplicações. Muitas de suas aplicações estruturais ocorrem nos variados setores da indústria, desde a alimentícia até aeroespacial e, assim, fornece uma grande quantidade desses produtos de aço inoxidável à disposição da sociedade (DAVIS, 2000). Esses materiais estão envolvidos em uma grande diversidade de aplicações como: vasos de reatores nucleares, trocadores de calor, tubulações industriais de óleo, componentes para processamento químico e indústria de papel, bombas hidráulicas, setor aeronáutico e aeroespacial, entre outras (LEFFLER, 2000; OUTOKUMPU STAINLESS, 2013).

Ao longo dos anos, o desenvolvimento dos aços inoxidáveis cresceu rapidamente sendo criado uma grande quantidade de séries e classificações. A principal forma de classificar os aços inoxidáveis é de acordo com a microestrutura predominante. Os três principais tipos de fases presentes em aços inoxidáveis são martensita, ferrita e austenita (LO, SHEK e LAI, 2009). Os aços inoxidáveis são divididos em: martensíticos, ferríticos, ferrítico-austeníticos (*duplex*), austeníticos e aços endurecíveis por precipitação (LO, SHEK e LAI, 2009; PRASAD, RAO e RAO, 2014).

Como já descrito, os nomes relativos aos cinco tipos de aços inoxidáveis estão relacionados com a microestrutura predominante do material, e o último grupo está relacionado com aqueles aços que podem ser endurecidos usando mecanismos de endurecimento como a precipitação dentro da microestrutura. Abaixo são descritos brevemente as principais características de cada uma das categorias de aços inoxidáveis, com exceção dos austeníticos, que serão discutidos em seção separada.

- **Aços inoxidáveis martensíticos** – São essencialmente ligas de Fe-C-Cr com pequenas quantidades de níquel, conteúdo de cromo entre 11,5 % e 18 %, quantidades de carbono acima de 1,20 % e pequenas quantidades de manganês e níquel (CHIAVERINI, 1986, 1988). Eles são amplamente utilizados para a fabricação de componentes com boas propriedades mecânicas e moderada resistência à corrosão, para que possam trabalhar em altas e baixas temperaturas (ISFAHANY, SAGHAFIAN e BORHANI, 2011). No entanto, esta pode ser prejudicada com o aumento do teor de carbono que pode levar a formação de carbonetos. A fração de volumétrica e o tamanho das partículas de carboneto presentes e a quantidade de austenita retida afetam diretamente sua dureza, resistência, tenacidade, resistência à corrosão e resistência ao

desgaste (RAJASEKHAR *et al.*, 2009; BARLOW e DU TOIT, 2012). Dentre os tipos comerciais mais comuns classificados de acordo com a norma AISI tem-se as ligas 403, 410, 414, 416, 420, 420F, 431, 440A, 440B, 440C e 440F (CHIAVERINI, 1986).

- **Aços endurecíveis por precipitação** – Os aços dessa categoria são ligas de cromo-níquel, onde o teor de cromo está entre 12 e 18 % e o níquel está entre 3 e 10 %, e podem ainda conter elementos de liga como alumínio, cobre ou titânio. Eles são caracterizados por poderem ser endurecidos por meio de tratamento térmico e dentro deles temos ainda os chamados aços *maraging*, o que lhe conferem grande aplicabilidade na indústria aeronáutica (CHIAVERINI, 1986). Para facilitar o processo de envelhecimento, muitas vezes o material é trabalhado a frio ou são adicionados elementos de liga como alumínio, nióbio, cobre e titânio (ANDRADE CENTENO, 2013). Dentre as ligas comerciais mais comuns tem-se o 17-4PH, 17-7PH, PH 15-7 Mo, AM-350, AM-355 e 17-10P (CHIAVERINI, 1988).
- **Aços inoxidáveis ferríticos** – Apresentam geralmente baixo conteúdo de carbono, entre 0,08 % a 0,12 % e tem o cromo como principal elemento de liga com valores entre 12 % e 30 % (CHIAVERINI, 1986). Eles apresentam uma boa resistência a corrosão sob tensão, resistência a oxidação a altas temperaturas, boa soldabilidade e boa formabilidade (MOHANDAS, MADHUSUDHAN REDDY e NAVEED, 1999; CHO *et al.*, 2011). Devido a essas características, os aços inoxidáveis ferríticos são largamente usados em sistemas de escapamento automotivo, conversores catalíticos, amortecedores, tubos de escape e entre outros componentes (CHO *et al.*, 2011). Dentre os tipos comerciais mais comuns com a designação AISI tem-se o 405, 406, 430, 430F, 442, 443 e 446 (CHIAVERINI, 1986).
- **Aços inoxidáveis ferrítico-austeníticos (duplex)** – são mais conhecidos como aços inoxidáveis duplex e são ligas baseadas no sistema ferro-cromo-níquel-molibdênio como baixos teores de carbono e, em alguns casos, adição de nitrogênio (DAVIS, 2000). Eles são comumente aplicados em indústrias tais como a química, de alimentos, de gás e óleo, dentre outras, devido à boa combinação de desempenho mecânico e de resistência à corrosão (SANTOS, TORRES e RAMIREZ, 2016). Alguns aços duplex podem ser aplicados em temperaturas abaixo de zero, apresentando boa resistência à corrosão sob

tensão; benefícios que são conseguidos devido sua microestrutura balanceada composta de grãos finos ferrítico-austeníticos e uma alta proporção de elementos ligantes (GARZÓN e RAMIREZ, 2006; SANTOS *et al.*, 2016). Dependendo da aplicação a proporção da microestrutura pode ser alterada de modo a favorecer a predominância da propriedade desejada. Dentre as ligas comerciais desse tipo de aço inoxidável pode-se citar 3RE60, SAF 2304, UR50, 2205, 44LN, DP3, *Ferralium*, 329 e 7-Mo plus (ANDRADE CENTENO, 2013).

3.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

3.3.1 Aspectos Gerais dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser geralmente divididos em dois grupos, conhecido como série 300 ASS (*Austenitic Stainless Steel*) e série 200 ASS (BANSOD *et al.*, 2017). O aço inoxidável austenítico AISI 304 é o mais largamente usado, o qual contém cerca de 18 % de Cr, 8 % de Ni e a quantidade de carbono está limitada a 0,08% (O'SULLIVAN, COTTERELL e MESZAROS, 2004; TOURKI, BARGUI e SIDHOM, 2005; PALIT SAGAR *et al.*, 2005; ASTUDILLO *et al.*, 2015). Em outro ponto, recentemente os aços da série 200 ASS, por apresentarem baixo ou nenhum conteúdo de níquel, receberam bastante atenção devido ao crescimento do preço do níquel no mercado (VASHISHTHA *et al.*, 2019; BANSOD *et al.*, 2017).

Esses aços constituem ligas ternárias de Fe-Cr-Ni que contêm altas porcentagens de cromo e níquel, e constituem a maior família dos aços inoxidáveis tanto em termos de quantidade de ligas como de uso (DAVIS, 2000; ASTUDILLO *et al.*, 2015). O Cr melhora propriedades de resistência a corrosão e o Ni a resistência a oxidação a altas temperaturas (CHIAVERINI, 1986, 1988). Além da boa resistência a corrosão, esses aços apresentam boa conformabilidade e soldabilidade, além de que o trabalho a frio permite aumentar sua resistência mecânica (OUTOKUMPU STAINLESS, 2013). Quando encruados eles apresentam um mecanismo de aumento de dureza que está atribuído a instabilidade da austenita, que sob o efeito de tensões de encruamento transforma-se parcialmente e progressivamente em martensita induzida por deformação plástica (CHIAVERINI, 1988).

Esses materiais tem extensa aplicação em diversos tipos de indústrias devido a sua combinação de boas propriedades de resistência mecânica e elevada

resistência a corrosão (VASHISHTHA *et al.*, 2017). Os empregos mais típicos desses materiais relacionados as suas características gerais são: ornamentação; utensílios domésticos; equipamentos para indústria química, petroquímica, automotiva, naval, de geração de energia, de transporte, de fabricação de alimentos, transporte; de peças para fornos; equipamento para processamento de alimentos; recipientes criogênicos; de estufas e peças de bombas, entre muitas outras (CHIAVERINI, 1988; TSENG e HSU, 2011; VASHISHTHA *et al.*, 2019).

3.3.2 Classificação dos Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços austeníticos constituem a maior família de aços inoxidáveis. Segundo (DAVIS, 2000) eles podem ser classificados em quatro grupos: Fe-Cr-Ni, Fe-Cr-Mn-Ni, altamente ligados Fe-Ni-Cr e superausteníticos. As características de todas as classes são discutidas brevemente abaixo:

- **Fe-Cr-Ni** – correspondem as ligas da série 300 e versões modificadas dessas ligas. Possuem como principal representante o aço inoxidável 304 que geralmente apresenta em sua composição 16 a 26 % de Cr, 10 a 22 % de Ni e pequenas quantidades de outros elementos ligantes como molibdênio, titânio, nióbio e nitrogênio. Embora seja um dos aços inoxidáveis austeníticos mais estudados, ainda existem muitos temas em aberto (comportamento da interface com metais de adição à base de prata), o que faz com eles continuem a ser objeto de diversas pesquisas (SANTOS e ANDRADE, 2010). Neste trabalho, ele é também alvo de estudo. Dentre as ligas comerciais dessa série pode-se citar o 302, 304, 305, 316 e 321.
- **Fe-Cr-Mn-Ni** – correspondem as ligas da série 200 e versões modificadas dessas ligas. Nesse grupo de materiais, o manganês apresenta-se em quantidades de 5 a 18 % e tem a função de substituir o níquel. O nitrogênio é um ligante comum nessas ligas. Dentre as ligas comerciais dessa classe pode-se citar o 201, 202, 204 Cu e 205.
- **Altamente ligados Fe-Ni-Cr** – essas ligas podem ser usadas em ambientes extremamente severos devido sua elevada resistência a corrosão, associada aos maiores teores de cromo e níquel que apresentam em suas composições.

O conteúdo de níquel nessas ligas pode ser maior do que 35 %. Molibdênio e cobre são ligantes comuns nessas ligas.

- **Superausteníticos** – essas ligas geralmente contêm um teor de molibdênio de 6%, além de maiores quantidades de cromo, níquel e nitrogênio visando melhorar a resistência a corrosão do material. Alguns exemplos de ligas comerciais são a liga 825, liga 254SMO, 20Cb3, 20Mo-6 e o tipo 330 (NOGARA e ZARROUK, 2018).

3.3.3 Propriedades Físicas e Mecânicas

Em geral, as propriedades físicas e mecânicas de aços inoxidáveis estão próximas das propriedades de aços carbono. Desta forma, a densidades dos aços inoxidáveis é de aproximadamente 8 g/cm^3 , o que é três vezes maior do que ligas de alumínio (DAVIS, 2000). Além disso, o módulo de elasticidade é de aproximadamente semelhante ao de aços macios, 210 MPa, sendo essa a resistência a tração mínima a temperatura ambiente (LIPPOLD, 2005).

Devido a sua estrutura austenítica esses aços inoxidáveis apresentam a características de serem paramagnéticos e não endurecíveis por tratamento térmico. Entretanto, a sua resistência mecânica pode ser melhorada consideravelmente se forem submetidos a deformação a frio, visto que o fenômeno de encruamento nesses aços permite é maior em função do maior coeficiente de encruamento do que um aço comum. Um aquecimento a temperaturas moderadas no aço encruado restaura a microestrutura austenítica por meio de um processo conhecido por recuperação e recristaliza (CHIAVERINI, 1986).

De modo a reter a estrutura austenítica a temperatura ambiente, evitando a precipitação de carbonetos de cromo, os aços inoxidáveis austeníticos são “austenitizados”, ou seja, aquecidos em temperaturas de 1000 e 1100 °C seguido de um resfriamento rápido em água ou ar. Depois de tratados termicamente, eles podem atingir limites de resistência a tração de 588 a 686 MPa, limites de escoamento de 206 a 275 MPa, alongamento de 45 a 60%, dureza Brinell de 140 a 175 HB e resistência ao choque correspondente de 95 a 149 kgf.m (CHIAVERINI, 1986). A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas a temperatura ambiente do aço inoxidável 304.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável 304 à temperatura ambiente

Liga	Resistência a tração MPa	Tensão de escoamento Mpa	Elongação (%)	Redução percentual de área (%)	Densidade (g/cm ³)
304	586	241	60	70	8

Fonte: Adaptado de Davis (2000).

3.3.4 Braseabilidade

Os aços inoxidáveis geralmente não apresentam grande dificuldade de serem unidos por brasagem do que os aços carbono e de aços carbonos baixa liga. Como mencionado, o cromo presente nos aços inoxidáveis promove a formação de uma fina película de óxido de cromo na superfície que confere a este sua alta resistência a corrosão (KOZLOVA, *et al.*, 2008). No entanto, se essa camada de óxido não for removida adequadamente da superfície antes do processo de brasagem, ela vai prejudicar o espalhamento do metal de adição sobre o metal de base, dificultando a ação da capilaridade e impedindo o preenchimento da junta (OLSON *et al.*, 1993; EUSTATHOPOULOS, NICHOLAS e DREVET, 1999; EUSTATHOPOULOS, HODAJ e KOZLOVA, 2013; VENKATESWARAN *et al.*, 2017). Um outro problema é a baixa solubilidade mútua entre a prata e o ferro (ZHU *et al.*, 2019).

A formação da camada de óxido de cromo é acelerada quando o material está em contato direto com o oxigênio presente no ar. Apesar da camada ser removida por limpeza mecânica ou química a temperatura ambiente, uma nova camada irá se formar rapidamente se o processo de brasagem for realizado ao ar ambiente, necessitando de fluxos de brasagem para retardar esse processo de repassivação (OLSON *et al.*, 1993). Os efeitos adversos da camada de óxidos podem ser minimizados por meio de:

- Limpeza química realizada a temperatura ambiente seguida de um aquecimento rápido até a temperatura de brasagem em uma atmosfera quimicamente inerte (argônio) ou vácuo;
- Aquecer o material em uma atmosfera altamente redutora;
- Aplicar fluxo de brasagem na área da junta visando dissolver a camada de óxido durante o aquecimento;
- Usar metais de adição de baixo ponto de fusão para reduzir a oxidação.

Pelo fato da extensa aplicabilidade dos aços inoxidáveis na indústria está relacionada com suas propriedades de resistência a corrosão é importante que essas propriedades não sejam prejudicadas durante o processo de brasagem. Isso pode ocorrer se ligas desestabilizadas tais como o tipo 302 ou 304, devido ao fenômeno de sensitização, tornarem o material suscetível a corrosão. Esse fenômeno ocorre devido a formação de carbonetos de cromo esgotando este elemento dos grãos vizinhos apresentando um comportamento anódico em relação a matriz prejudicando a resistência a corrosão das regiões depletadas de Cr, uma vez que o cromo é o principal contribuinte para as propriedades de inibição de corrosão do aço inoxidável (LIPPOLD e KOTECKI, 2005; ROBERTS *et al.*, 2021). Uma maneira de minimizar esse problema é usar ciclos térmicos curtos de brasagem ou então utilizar temperaturas acima do intervalo de precipitação dos carbeto (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

3.4 PROCESSO DE BRASAGEM

3.4.1 Aspectos Gerais da Brasagem

É um dos processos de união de metais mais importantes, sendo bastante aplicado para união de materiais ferrosos e não ferrosos. A *American Welding Society* (AWS) define brasagem como um processo que produz a coalescência do metal de adição com temperatura *liquidus* superior a 450 °C e inferior a temperatura *solidus* do metal de base. Além disso, a denominação de soldagem branda é usada para os processos de união que ocorrem com consumíveis de temperaturas de fusão inferiores a 450 °C.

A brasagem é um processo em que deve haver fusão somente do metal de adição. Enquanto isso, na soldagem geralmente é requerida a fusão localizada do metal de base junto com o metal de adição (ROBERTS, 2013). O uso da soldagem em sistemas com topologia complexa, como também em locais onde não é desejável grandes distorções das peças trabalhadas, não é frequentemente viável. Isso torna a brasagem um processo de união preferível (PHILIPS, LEVI e EVANS, 2008).

A brasagem tem grandes vantagens em relação a outros processos de união como a capacidade de unir metais dissimilares de forma mais simples, unir componentes com geometrias complexas e produzir poucas modificações nos

materiais a serem unidos (SHAJI *et al.*, 2020; WAY, WILLINGHAM e GOODALL, 2020). O uso da brasagem vem aumentando recentemente na indústria e isso se deve a algumas vantagens do processo, tais como: boa produtividade e baixo custo, pouco ou nenhuma distorção dos componentes unidos, baixa dissolução de metal de base, união mais simples de metais dissimilares, preenchimento de pequenos e grandes espaçamentos (METCO, 2011).

Um aspecto importante da brasagem é que o metal de adição se distribui na folga da junta dos materiais por meio dos fenômenos de molhabilidade e capilaridade, conceitos que serão definidos mais à frente, sendo ambos muito importantes para uma boa qualidade da junta brasada. Outros aspectos que devem ser considerados para melhorar a qualidade da junta brasada são: a distância entre as juntas, o tipo de metal de adição que deve ser adequado ao metal base, o tempo de processo, o substrato utilizado, a temperatura aplicada, a preparação da superfície e o fluxo a ser usado (SCHWARTZ, 2003; MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011; ANIL KUMAR e GANDHINATHAN, 2020).

Na brasagem de aços inoxidáveis da série 300 (austeníticos), os métodos de aquecimento mais usados são: brasagens por tocha e por forno. Na brasagem por forno as peças devem ser brasadas cuidadosamente para evitar distorções nos componentes, principalmente se o processo for em fornos contínuos montagens complexas ou montagens com materiais dissimilares. Essa preocupação se deve ao alto valor de expansão térmica e a baixa condutividade térmica de alguns materiais (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

Uma forma de classificar os processos de brasagem é pelo método de aquecimento utilizado. Segundo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011) os processos de maior importância industrial são: brasagem por chama; brasagem por indução; brasagem por infravermelho; brasagem por imersão; brasagem por forno e brasagem por resistência elétrica. Dentre esses métodos destaca-se a brasagem por chama (tocha), brasagem por forno e brasagem por indução.

Os métodos de aquecimentos empregados estão diretamente relacionados com a ação da capilaridade na junta, onde a eficiência da atuação dessa ação requer um aquecimento eficiente promovido pela fonte de calor na junta. Dentre os fatores que mais influenciam a escolha do método de aquecimento tem-se, o tamanho das montagens, o número de componentes requeridos e a taxa de produção necessária. Além disso, devem ser consideradas a variação da taxa de aquecimento, dos

gradientes térmicos e taxas de resfriamento, que variam de acordo com o método empregado e afetam integridade da junta (SCHWARTZ, 2003).

3.4.2 Molhabilidade e Capilaridade

A capilaridade é um dos fenômenos mais importantes para a brasagem porque torna possível que o metal de adição escoe sobre a superfície dos metais a serem unidos e preencha o espaçamento da junta entre eles. A capilaridade está relacionada com a atração molecular de líquidos entre si ou líquidos com sólidos, que é o que acontece na brasagem. Na prática, as características de escoamento do metal de adição são influenciadas por fatores como a fluidez, viscosidade, pressão de vapor, gravidade e especialmente por efeitos metalúrgicos entre o metal de base e o metal de adição (SCHWARTZ, 2003).

Outro conceito muito importante é o de molhabilidade, que pode ser definida pela capacidade que o metal de adição tem de se espalhar e aderir sobre uma superfície sólida. O escoamento do metal de adição ocorre pela ação da capilaridade, que é a força responsável pelo preenchimento do líquido em espaços sólidos extremamente estreitos (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). A temperatura de molhabilidade é um parâmetro importante para o processo de brasagem, isto porque o uso de temperatura muito altas pode prejudicar a microestrutura e as propriedades do material (KOZLOVA et al., 2008).

Em uma junta apropriada, o metal de adição preenche completamente a área da junta sem apresentar vazios ou falhas de preenchimento. Para isso, a molhabilidade e o espalhamento são muito importantes no processo de brasagem. Fatores importantes devem ser considerados principalmente as condições da superfície sólida do metal de base como a presença de óxidos, rugosidade e elementos ligantes do metal de base e metal de adição, todos esses fatores podem afetar negativamente a molhabilidade e o escoamento (OLSON *et al.*, 1993). Com relação a rugosidade, de maneira geral é observado que uma melhor preparação superficial tende a melhorar a molhabilidade e espalhamento do metal de adição. Chen, Duh e Chiou (2000) constaram que a molhabilidade de soldas de Sn-Bi tende a diminuir à medida que a rugosidade superficial do substrato aumenta.

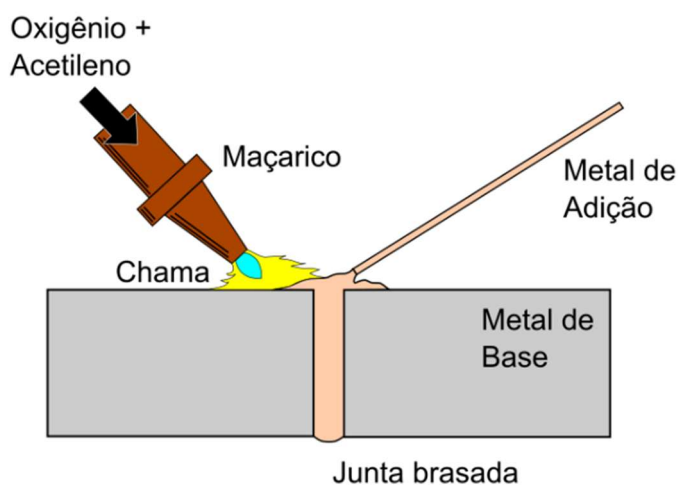
A molhabilidade de um metal de adição sobre um substrato metálico pode ser medida de forma quantitativa através de um ensaio de molhabilidade. Nesse ensaio o

metal de adição é posicionado sobre o substrato metálico e é aquecido até sofrer fusão, em seguida a área de espalhamento é medida e pode ser comparada com outras condições. Chen *et al.* (2013) concluíram que o aumento do tempo de sulfuração da liga ternária AgCuZn diminui dramaticamente a área de espalhamento devido a existência de sulfuretos como partículas sólidas. Ma *et al.* (2016) constataram que a adição de Ga na liga quaternária AgCuZnSn aumentou a área de espalhamento devido ao Ga promover uma transferência de massa da parte de pré-espalhamento da solda, que consiste de solução sólida de Cu e solução sólida de Ag, diminuindo tensão superficial entre o metal de adição e o metal de base. Venkateswaran *et al.* (2017) conseguiram aumentar a área de espalhamento da liga quaternária CuAgMnZn adicionando um revestimento de Ni sobre o metal de base, onde o Ni tende a agir como um bom separador entre o Ag-Cu do metal de adição e o Ferro ajudando na formação de uma boa ligação entre ambos.

3.4.3 Brasagem por Tocha Oxiacetilênica

É um processo muito conhecido, sendo também chamada de solda oxiacetilênica. Neste processo, a fonte de calor é uma chama proveniente da queima de uma mistura de gases, geralmente oxigênio, gás natural, propano ou acetileno (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). A seleção dessa mistura é bastante dependente da quantidade de calor requerida e da temperatura necessária para operação. Na Figura 3 é apresentado um esquema do processo e o conjunto de alimentação de gases portátil manual comumente utilizado para brasagem por tocha.

Figura 3 - Esquema do processo de brasagem por tocha oxiacetilênica manual

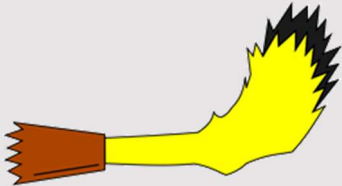
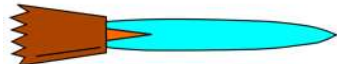


Fonte: O autor (2021).

O processo é realizado pelo aquecimento da região da junta entre os metais de base, onde o metal de adição pode ser preposicionado ou adicionado no momento em que o conjunto atingir a temperatura de brasagem (OLSON *et al.*, 1993). O processo pode ser feito de forma totalmente manual, parcialmente mecanizada ou ainda de forma inteiramente automatizada, sendo essa última opção mais usada para maiores volumes de produção (ANDRADE CENTENO, 2013). Aplicações típicas desse tipo de processo envolvem a união de tubulações usando metais de adição à base de cobre ou a base de prata (METCO, 2011).

De acordo com a necessidade do processo a mistura de gases pode ser alterada, produzindo diferentes condições de aquecimento. Segundo Schwartz (2003) os tipos de condições de chamas são: chama de carburação, chama de redução, chama neutra e chama de oxidação. Esses diferentes tipos de chama apresentam diferentes níveis de energia de calor que pode ser entregue a peça. Paul *et al.* (2016) verificou que o fluxo de calor promovido pela chama aumenta da condição redutora para neutra para oxidante, esta última que apresentou maior pico de energia. Essa maior energia associado está justamente ligada ao seu excesso de oxigênio. A Tabela 2 apresenta as características dos principais tipos de chama.

Tabela 2 - Tipos de chama mais utilizados na brasagem por tocha

Representação	Descrição
Chama Acetilênica 	Esse tipo de chama pode ser usado para brasagem e é conseguida quando a proporção de oxigênio para gás combustível é pequena, apresentando fuligem. À medida que a proporção de oxigênio é aumentada a chama se torna luminosa e fuligem desaparece.
Chama Redutora 	Pode ser usada para brasagem e apresenta um pouco de oxigênio em relação ao combustível. Devido a essa menor quantidade de oxigênio a área luminosa se torna menor, apresentando um cone interno com trilha estendida até o fim da chama.
Chama Neutra 	É geralmente usada na brasagem quando a chama redutora pode ser prejudicial ao metal devido ao excesso de carbono. Ela apresenta uma proporção equilibrada de gás combustível e oxigênio.
Chama Oxidante 	Essa chama apresenta maiores proporções de oxigênio tornando-a oxidante. Esse tipo de chama não é recomendado para brasagem, pois promove oxidação do metal de base e do metal de adição, e essa oxidação dificulta o molhabilidade e o escoamento do metal de adição.

Fonte: Adaptado de Schwartz (2003).

A mistura oxiacetileno é uma das mais utilizadas no mercado, pois permite alcançar temperaturas maiores (SCHWARTZ, 2003). O gás acetileno é geralmente armazenado dissolvido em acetona em cilindros com células internas parcialmente separadas. Esse método é um dos mais bem empregados para garantir a segurança contra risco de explosões, visto que esse gás é extremamente inflamável (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Por questões de segurança o ideal é nunca usar o acetileno em pressões acima da pressão atmosférica (103 kPa). A Equação (1) apresenta a reação de combustão completa do acetileno com gás oxigênio.



Dentre as vantagens desse processo destaca-se a versatilidade (processo manual ou automático), o equipamento é de fácil locomoção, o investimento inicial é baixo, é mais prático para montagens complexas, os consumíveis podem ser pré-fixados ou alimentados e a operação deste processo é de fácil manuseio (WAY, WILLINGHAM e GOODALL, 2020). Com relação as limitações destacam-se: a

dificuldade de brasar peças de grande massa, a reatividade que alguns materiais podem apresentar a chama, a temperatura máxima é em geral limitada a 982°C, o controle de temperatura não é preciso (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991), além de exigir perícia do operador.

O uso da brasagem por tocha em aços inoxidáveis deve apresentar uma chama adequada que não prejudique a resistência a corrosão ou características metalúrgicas do material. Para prevenir a formação de oxidação na superfície das peças de trabalho é necessário o uso de chamas que variam de neutra para ligeiramente redutora (OLSON *et al.*, 1993). A chama redutora também é bastante satisfatória para brasagem de aços carbono.

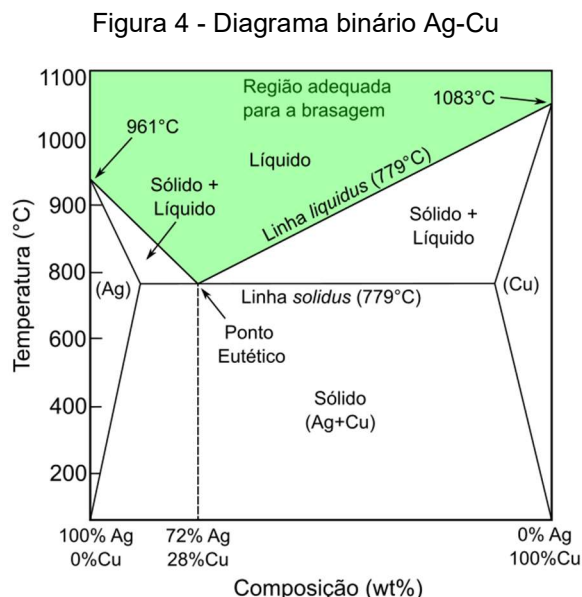
3.5 METAIS DE ADIÇÃO

A escolha adequada do metal de adição é um ponto importante para obter uma junta brasada com boa qualidade. O principal fator que deve ser levado em consideração nessa escolha é o material do metal de base, onde devem ser considerados aspectos como a compatibilidade química e o intervalo de fusão dos materiais. Existem algumas características importantes aos metais de adição para que o processo de brasagem ocorra de forma adequada (SCHWARTZ, 2003), dentre elas:

- Apresentar boa molhabilidade sobre o metal de base;
- Intervalo de fusão que permita que o efeito de capilaridade e o preenchimento da junta ocorra de maneira adequada;
- Satisfazer os requisitos de projeto necessários para a aplicação;
- Não ser um elemento reativo ao metal de base;
- Não apresentar temperatura *liquidus* superior a temperatura *solidus* do metal de base.

Uma característica importante dos metais de adição é que eles geralmente são ligas binárias, dessa forma não existe um intervalo de fusão bem definido. Com isso, é importante entender aspectos sobre o diagrama de equilíbrio das ligas envolvidas no processo de brasagem. A Figura 4, por exemplo, apresenta o diagrama de fases da liga binária cobre-prata. Abaixo da linha *solidus* tem-se as temperaturas em que a

liga é sólida e acima da linha *liquidus* tem-se as temperaturas em que a liga é completamente líquida. Para uma brasagem adequada a temperatura do processo deve estar acima da temperatura “*liquidus*” do consumível para facilitar o escoamento, representado pelo preenchimento em verde-claro na Figura 4.



Fonte: Adaptado de AWS (1991).

É importante ressaltar que existe uma ampla variedade de metais de adição e eles são geralmente classificados de acordo com o elemento químico predominante em suas ligas. A AWS A5.8/A5.8M (2004) classifica os metais de adição em diferentes famílias, onde cada família tem um elemento base característico em comum. As principais categorias de metais de adição, de acordo com a classificação AWS, são: alumínio-silício (BAISi), magnésio (BMg), cobre (BCu), prata (Bag), ouro (Bau), níquel (BNi), paládio (BPd) e cobalto (BCo) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

Cada uma das famílias de metais de adição diferencia-se entre si não somente pela composição química mais também pelos intervalos de fusão. Essa característica é bastante importante pois vai influenciar bastante na escolha do metal de adição de acordo com o metal de base. É conhecido que o intervalo de fusão do consumível deve ser menor do que o do metal de base, entretanto vale ressaltar que quanto menor a temperatura de fusão do consumível, menor o risco de fundir o metal de base e menores serão os custos e a duração do processo de brasagem.

Um outro aspecto bastante importante dos metais de adição é que eles podem ser comprados do fornecedor em uma grande variedade de formas, onde a escolha

da forma para a aplicação vai depender dos seguintes fatores: geometria da junta, método de aquecimento, grau de automação desejado, acabamento final e número de montagens a serem produzidas (SCHWARTZ, 2003). As formas mais comuns dos consumíveis são na forma de pó, pasta, bobinas, formas pré-formadas, folhas e varetas ou arames (METCO, 2011).

Existe uma grande variedade de metais de adição disponíveis comercialmente para brasagem de aço inoxidável. Dentre esses metais de adição disponíveis comercialmente, estão incluídos alguns consumíveis da família BCu, BAg, BNi, BCo, BPd e BAu (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Dentre estes, os consumíveis mais usados para brasagem de aços inoxidáveis são os de níquel, prata, cobre e ouro. Os metais de adição à base de prata serão discutidos com mais detalhes na próxima seção. A Tabela 3 apresenta as principais características dos metais de adição recomendados para brasagem de aços inoxidáveis.

Tabela 3 - Características dos metais de adição usados para brasagem de aços inoxidáveis

Metal de Adição	Intervalo de brasagem (°C)	Custo Relativo	Propriedades
BNi	927 – 1205	Moderado	Boa resistência a oxidação e resistência mecânica a altas temperaturas.
BAg	620 – 980	Elevado	Boa resistência a corrosão e excelentes propriedades de resistência mecânica
BAu	890 – 1230	Muito elevado	Alta condutividade elétrica e excelente resistência a corrosão
BCu	705 – 1150	Baixo	Resistência a corrosão limitada e boa molhabilidade

Fonte: Adaptado de AWS (2004) e Schwartz (2003).

3.5.1 Metais de Adição à Base de Prata

A família dos metais de adição à base de prata é uma das que possui a maior quantidade de metais de adição. Estes, são comumente usados para unir metais ferrosos e não ferrosos, exceto alumínio e magnésio (DEV e SIVARAMAKRISHNAN, 1996; SCHWARTZ, 2003; XUE *et al.*, 2019). Podem ser usados diversos elementos de liga para melhorar as propriedades dos consumíveis a base de prata, tais como: cobre, zinco, cádmio, titânio, manganês, níquel e lítio (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). A prata geralmente não tem boa molhabilidade em metais ferrosos, por isso é adicionado o zinco para reduzir a temperatura de fusão e ajudar a melhorar a molhabilidade sobre o ferro, cobalto e metais à base de níquel.

O cádmio também pode ser utilizado para reduzir a temperatura de fusão e intensificar a molhabilidade do metal de adição. No entanto, os fumos de óxido de cádmio produzidos durante a brasagem são perigosos e tóxicos. Indústrias de equipamentos elétricos na UE (União Europeia), EUA (Estados Unidos), Japão e China têm sido incentivadas ou restringidas por normativas a limitar o uso desta liga somente no setor elétrico e eletrônico (MA *et al.*, 2016), ainda que novas diretrizes tais como UE RoHs (União Europeia), RoHs 2 (China), J-Moss (Japão) e SB20/SB50 (Estados Unidos) preveem a eliminação deste, inclusive, em circuitos eletrônicos (KROUPA *et al.*, 2012; CHENG, HUANG e PECHT, 2017; SIQUEIRA *et al.*, 2021). Desta forma, sempre que possível devem ser usados os metais de adição livres de cádmio. A Tabela 4 apresenta a composição química e o intervalo de fusão de alguns metais de adição à base de prata.

Tabela 4 - Composição química de metais de adição à base de prata de acordo com a AWS

Classificação AWS	Composição (%)					Temperatura de brasagem (°C)
	Ag	Cu	Zn	Cd	Sn	
BAG-1	44,0 – 46,0	14,0 – 16,0	14,0 – 18,0	23,0 – 25,0	–	618 – 760
BAG-1a	49,0 – 51,0	14,5 – 18,5	14,5 – 18,5	17,0 – 19,0	–	635 – 760
BAG-2	34,0 – 36,0	25,0 – 27,0	19,0 – 23,0	17,0 – 19,0	–	702 – 843
BAG-3	49,0 – 51,0	14,5 – 16,5	13,5 – 17,5	15,0 – 17,0	–	688 – 816
BAG-5	44,0 – 46,0	29,0 – 31,0	26,0 – 30,0	–	–	743 – 843
BAG-6	49,0 – 51,0	33,0 – 35,0	14,0 – 18,0	–	–	774 – 871
BAG-7	55,0 – 57,0	21,0 – 23,0	15,0 – 19,0	–	4,5 – 5,5	652 – 760
BAG-18	59,0 – 61,0	Restante	–	–	9,5 – 10	718 – 843
BAG-21	62,0 – 64,0	27,5 – 29,5	–	–	5,0 – 7,0	802 – 899
BAG-24	49,0 – 51,0	19,0 – 21,0	26,0 – 30,0	–	–	707 – 843
BAG-28	39,0 – 41,0	29,0 – 31,0	26,0 – 30,0	–	1,5 – 2,5	710 – 843
BAG-34	37,0 – 39,0	31,0 – 33,0	26,0 – 30,0	–	1,5 – 2,5	721 – 843

Fonte: AWS (2004).

Dentre os metais de adição usados para brasagem de aços inoxidáveis, em aplicações que não há uma grande preocupação com a resistência a corrosão podem ser usados os metais de adição BAG-1, BAG-1a e BAG-2. Em outro ponto, quando é necessário melhorar a resistência a corrosão é recomendado o uso de metais de adição livres de níquel como o BAG-3 e o BAG-24. Os metais de adição BAG-5 e BAG-6 podem ser usados no lugar do BAG-24 quando o cádmio é proibido (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

Os metais de adição que contém zinco e cádmio, como o BAG-3, são os mais recomendados para brasagem de aços inoxidáveis usando tocha com aplicação de

fluxos e não devem ser considerados para brasagem por forno. Além disso, dentre os metais de adição da Tabela 4, exceto o BAg-19 e BAg-13, todos podem ser usados para brasagem em temperaturas fora do intervalo de temperatura sensibilizante (600 e 850 °C) dos aços inoxidáveis austeníticos (OLSON *et al.*, 1993).

Os metais de adição baseados na liga quaternária Ag-Cu-Zn-Sn foram criados com o intuito de substituir os metais de adição contendo cádmio, e sua performance e braseabilidade tem sido alvo de pesquisa por bastante tempo (LI *et al.*, 2005; WIERZBICKI *et al.*, 2011; MA, XUE e WANG, 2016). A adição de Sn permite reduzir o ponto de fusão da liga, melhorar o espalhamento e a resistência a corrosão (SCHWARTZ, 2003; WIERZBICKI *et al.*, 2011). Entretanto, ainda não foi possível desenvolver metais de adição que apresentassem pontos de fusão baixos e bons níveis de fluidez como os que contém cádmio (SIQUEIRA *et al.*, 2021). Existem diversos estudos na literatura buscando propor outros elementos ligantes que possam substituir o cádmio sem sacrificar as propriedades inerentes desses consumíveis: Sn, Ga, In, Ni e Ca (ZHONGMIN *et al.*, 2010; WINIOWSKI e RÓŻAŃSKI, 2011; SUI *et al.*, 2013; MA, XUE e WANG, 2016; WANG, LI e PENG, 2018).

Apesar dos aspectos prejudiciais da utilização de cádmio em metais de adição à base de prata, devido às suas vantagens, são ainda amplamente aplicadas onde não há contato direto com humanos, e ainda existem estudos sobre seu uso na união de cobre e suas ligas (ESMATI *et al.*, 2014; TAJFAR, GANJEH e MIRBAGHERI, 2016). O alto custo relativo da prata é outro fator limitante para sua ampla utilização em metais de adição, tornando-os aplicáveis onde outros tipos de metais de adição não podem ser bem utilizados (ZHONGMIN *et al.*, 2010; WAY, WILLINGHAM e GOODALL, 2020) ou onde rigorosos requisitos mecânicos são necessários. Portanto, é relevante a realização de estudos que avaliem a redução do teor de prata nos metais de adição para oferecer o melhor desempenho e relação custo-benefício (ZHONGMIN *et al.*, 2010; WINIOWSKI e RÓŻAŃSKI, 2011). Tais metais de adição têm grande importância na indústria aeronáutica na fabricação de linhas de oxigênio de alta pressão e outras partes que devem suportar vibração e altas temperaturas (AFS-640, 1998). Adicionalmente, novas formulações são muito bem vindas nestes novos estudos. Nesse trabalho, foi adicionado óxido de grafeno de forma a avaliar a braseabilidade, desempenho mecânico e desenvolvimento microestrutural.

3.5.2 Fluxos de Brasagem

Os fluxos, juntamente aos metais de adição e metais de base são um dos principais elementos do processo de brasagem. Apesar de não ser utilizado em todas as aplicações, como a brasagem por forno. O fluxo tem a função de remover os óxidos remanescentes do processo de pré-limpeza do metal de base e os óxidos presentes no metal de adição, promovendo uma melhora na molhabilidade e escoamento do metal de adição sobre o substrato metálico (SCHWARTZ, 2003; ROBERTS, 2013). Nos aços inoxidáveis, por exemplo, a camada protetiva de óxido é restaurada rapidamente em contato com o ar, agindo como uma barreira à molhabilidade (OLSON *et al.*, 1993; EUSTATHOPOULOS, NICHOLAS e DREVET, 1999). Nesse caso, o fluxo tende a impedir a restauração da camada de óxidos de cromo facilitando o escoamento do metal de adição na brasagem.

No mercado existem diversos tipos de fluxos com as mais variadas composições químicas e propriedades para diversas aplicações. A composição dos fluxos deve ser cuidadosamente elaborada visto que a interação dos componentes do fluxo com o oxigênio da atmosfera, metal de base e metal de adição aumentam com a temperatura. Os compostos químicos mais comuns presentes nos fluxos são: boratos, boro elementar, fluoboratos, fluoretos, cloretos, ácidos, álcalis e água (SCHWARTZ, 2003).

Não existe um fluxo que tenha as propriedades adequadas para ser aplicado em todos os processos de brasagem. Os fluxos são classificados a partir da norma AWS A5.31 (2012) em grupos de acordo com o material dos metais de base a serem unidos e os intervalos de temperatura de trabalho. Existem cinco categorias principais de fluxos de brasagem que são: alumínio, alumínio-bronze, prata, magnésio e fluxos de alta temperatura. A Tabela 5 apresenta algumas especificações dos principais tipos de fluxos empregados na brasagem de ligas ferrosas, incluindo os aços inoxidáveis e das ligas não ferrosas.

Tabela 5 - Características dos principais fluxos para brasagem de acordo com a AWS

Designação AWS	Forma	Metal de adição	Aplicação	Temperatura de trabalho (°C)	Metal de base recomendado
FB3-A	Pasta	B _{Ag} , B _{CuP}	Propósito geral, exceto: alumínio e bronze	565 – 870	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-C	Pasta	B _{Ag} , B _{CuP}	Similar a FB3-A	565 – 925	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-D	Pasta	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} e R _B C _u Zn	Similar a FB3-C	760 – 1205	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-E	Líquido	B _{Ag} , B _{CuP}	Brasagem por forno	565 – 870	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-F	Pó	B _{Ag} , B _{CuP}	Similar a FB3-A	650 – 870	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-G	Lama	B _{Ag} , B _{CuP}	Similar a FB3-A	565 – 870	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-H	Lama	B _{Ag} , B _{CuP}	Similar a FB3-C	565 – 925	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-I	Lama	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} e R _B C _u Zn	Similar a FB3-D	760 – 1205	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg
FB3-J	Pó	B _{Ag} , B _{Cu} , B _{Ni} , B _{Au} e R _B C _u Zn	Similar a FB3-D	760 – 1205	Ligas ferrosas e não-ferrosas exceto: Al e Mg

Fonte: AWS (2004).

Assim como os metais de adição, os fluxos podem ser fornecidos em diferentes formas. As formas mais comuns são pó, pasta, lama ou líquido. A escolha da forma vai depender de requerimentos específicos do processo de brasagem, características da peça de trabalho e o procedimento de brasagem utilizado (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Apesar disso, os fluxos na forma de pasta são os mais comumente empregados porque podem ser aplicados em peças pequenas e apresentam boa aderência em qualquer posição (SCHWARTZ, 2003). Outra forma comum de usar os fluxos é como revestimento internos ou externos em varetas de metal de adição o que é uma alternativa bastante versátil.

Durante o processo de brasagem por tocha com metal de adição à base de prata em um ambiente oxidante o fluxo é requerido. Podem ser usados fluxos minerais como o FB3-A, ou outras classificações da Tabela 5, na forma de pó, pasta ou lama. De forma geral, todos os fluxos do tipo FB3-A até FB3-J podem ser utilizados para

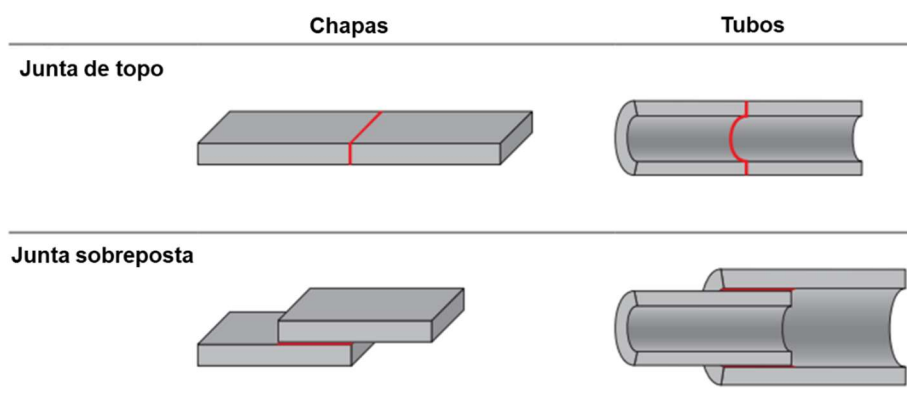
aplicações de brasagem de aços inoxidáveis usando metais de adição à base de prata (OLSON *et al.*, 1993).

3.5.3 Projeto da Junta

O projeto da junta é de fundamental importância para a uma brasagem adequada. A escolha do tipo de junta e detalhes de dada aplicação depende de fatores como: composição do metal de base e do metal de adição, das condições de serviço, do tipo de brasagem, da quantidade de peças, da forma do metal de adição e do tipo de fluxo (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011). Outro ponto a ser observado são as propriedades da junta, dentre as quais podemos destacar: resistência ao cisalhamento, tensão de ruptura, dureza, resistência a corrosão e oxidação, microestrutura e configuração da junta (METCO, 2011).

Na brasagem, geralmente, são utilizadas juntas do tipo sobrepostas e de topo. As juntas de topo apresentam preparação simples e resistência satisfatória para muitas aplicações. As juntas sobrepostas apresentam melhor resistência mecânica em relação as juntas de topo, pois apresentam uma maior área de junta disponível e o esforço é transmitido primeiramente por tensão de cisalhamento, o qual é mais desejável (SCHWARTZ, 2003). A Figura 5 apresenta a configuração desses dois tipos de juntas para chapas e tubos.

Figura 5 - Tipos de juntas mais usadas para chapas e tubos

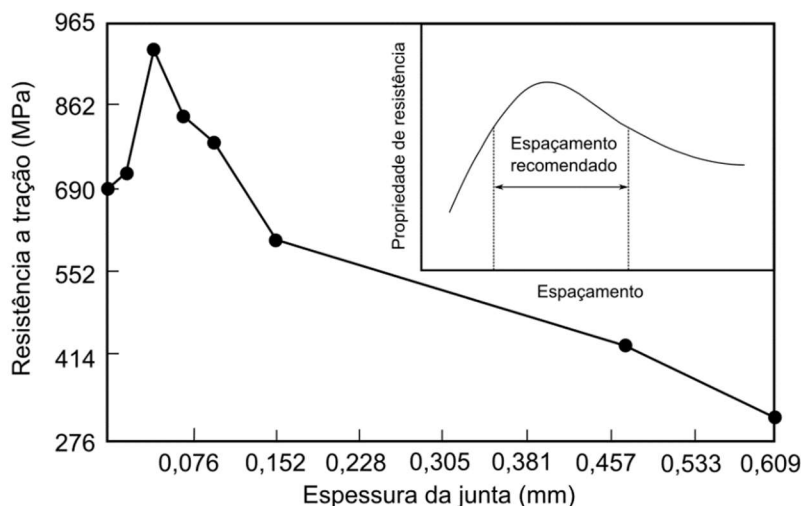


Fonte: Adaptado de Metco (2011).

O espaçamento entre as chapas ou tubos apresenta grande influência sobre as propriedades mecânicas da junta brasada. Por exemplo, a Figura 6 apresenta uma

análise quantitativa e qualitativa da variação da resistência a tração de uma junta de aço inoxidável com o espaçamento entre as juntas de topo, onde foi usado um metal de adição à base de prata (BAg-1) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

Figura 6 - Efeito do espaçamento da junta na resistência mecânica



Fonte: Adaptado de AWS (1991) e Marques *et al.* (2011).

É possível notar que existe um intervalo de espaçamento com valores ótimos onde a junta apresenta maiores valores de resistência ao cisalhamento. Caso as juntas estejam muito próximas, não haverá espaço suficiente para o metal de adição escoar, podendo acarretar falhas de preenchimento e formação de poros na junta. Se as juntas estiverem muito afastadas ocorrerá uma diminuição da ação capilar tornando esses materiais menos resistente (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2011; RUDNEV, LOVELESS e COOK, 2017).

De maneira geral, juntas consideradas fortes são aquelas onde a área da junta está totalmente preenchida pelo metal de adição. Segundo Schwartz (2003) juntas com espaçamentos de 0,03 mm a 0,08 mm melhoram a ação da capilaridade e fornecem juntas mais resistentes. De forma geral, para metais de adição à base de prata, o espaçamento recomendado é de 0,05 mm a 0,13 mm. Entretanto, é importante ressaltar que outros fatores podem influenciar o espaçamento ótimo entre as juntas para um metal de adição específico como a temperatura de brasagem e reações do metal de base. Roberts (2013), por exemplo, recomenda que seja usado um espaçamento entre junta no intervalo de 0,2 mm e 0,5 mm para brasagem por chama manual.

3.6 BRASAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS USANDO METAIS DE ADIÇÃO À BASE DE PRATA

A brasagem é um método que tem sido amplamente utilizado em indústrias de alta tecnologia por apresentar menores custos e oferecer uma série de vantagens (GARCÍA-VÁZQUEZ *et al.*, 2010). A brasagem é um processo que tem boa aplicabilidade para união de aços inoxidáveis, que são materiais largamente aplicados em diversos setores industriais. Existe uma ampla variedade de metais de adição comercialmente disponíveis para brasagem desses materiais incluindo prata, níquel, cobre e ouro (KHORRAM *et al.*, 2016). Apesar das boas indicações para o uso da brasagem para união de aços inoxidáveis é importante tomar precauções com relação ao fenômeno de sensitização sofrido por esses aços, fenômeno esse que já foi explicado nas seções anteriores.

Os metais de adição à base de níquel e de prata são os mais indicados para realizar a brasagem de aços inoxidáveis austeníticos (SCHWARTZ, 2003). Contudo, os metais de adição à base de prata são mais usados por apresentarem menores pontos de fusão e conseqüentemente requererem menores temperaturas de brasagem (LIU, OU e SHIUE, 2002). Os metais de adição à base de níquel devem ser utilizados quando se necessita de uma elevada resistência a corrosão em altas temperaturas. Desta forma, a escolha do consumível está condicionada aos requisitos da aplicação do componente brasado.

As pesquisas na literatura relacionadas ao uso do metal de adição à base de prata para brasagem de aços inoxidáveis austeníticos estão mais concentradas na união dissimilar (LIU, OU e SHIUE, 2002; CAO *et al.*, 2011; MA, XUE e WANG, 2016; XUE *et al.*, 2019), ou seja, na união de aços inoxidáveis com outros materiais como latão ou ligas de titânio. Apesar do presente trabalho tratar de uma união similar de aço inoxidável 304, estas pesquisas são importantes para que sejam entendidas as interações microestruturais que ocorrem entre esse tipo de metal de adição e os aços inoxidáveis austeníticos, permitindo também entender qual a sua influência na performance mecânica das juntas brasadas.

Liu *et al.* (2002) investigaram o desempenho de três metais de adição à base de prata, sendo eles Braze 580, BAg-8 e Ticusil, para brasagem a vácuo de Ti-6Al-4V ao aço inoxidável 304 (304SS). Nos resultados, foi observado que a espessura da

camada de reação 580/ Ti-6Al-4V foi maior que a interface 580/304SS. A camada de reação entre Braze 580 e 304SS é composta principalmente de Ti, Fe e Cu. Já a camada de reação entre Braze 580 e Ti-6Al-4V apresenta um composto intermetálico ternário contínuo de Cu-Sn-Ti. Também foi verificado que a formação da camada interfacial de Cu-Ti-Fe pode reduzir a molhabilidade do BAg-8 e Ticusil.

Cao *et al.* (2011) investigaram a influência do conteúdo de Ag na microestrutura e propriedades de juntas de latão/aço brasadas por indução usando metal de adição à base de prata (AgCuZnSn). As juntas foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura e ensaios mecânicos. A junta brasada era composta de solução sólida de Ag, solução sólida de Cu e composto eutético. Foi verificado que o aumento de Ag e da taxa de resfriamento levou ao acréscimo de estruturas eutéticas na forma de agulha. Além disso, esse aumento das estruturas eutéticas causou redução da resistência a tração, onde a junta com 45 % de Ag alcançou o menor valor, em contraste, com a junta com 25 % de Ag que obteve a melhor performance.

Sui *et al.* (2013) analisaram o efeito na microestrutura e propriedades mecânicas de diferentes conteúdos de Ca em metais de adição Ag-Cu-Zn para brasagem por indução de aço inoxidável 316LN. A partir dos resultados foi verificado que o aumento do conteúdo de Ca promoveu a formação de fase metálicas frágeis (CaCu) que levaram a formação de vazios. As juntas contendo cálcio apresentaram maiores valores de microdureza do que juntas brasadas sem o cálcio. Além disso, foi verificado que o aumento do teor de Ca causou uma diminuição da resistência a tração devido a formação de grão mais grosseiros, intermetálicos frágeis e vazios. Por fim, neste trabalho foi constatado que o efeito de grãos grosseiros, fases frágeis e vazios provocam a redução da resistência a tração e microdureza.

Khorram *et al.* (2016) estudaram a microestrutura e propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico 321 e do aço inoxidável martensítico 410 brasados a laser usando metal de adição à base de prata. As microestruturas foram investigadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva de raio-X (EDS). A partir dos resultados foi constatado que na junta brasada a presença de solução sólida de α -Ag, solução sólida de α' -Cu cercada pela solução sólida α -Ag e composto eutético. As juntas de aço inoxidável 321 apresentaram maior resistência que as juntas de aço inoxidável 410 devido a maior espessura da camada de reação, maior espalhamento e menor ângulo de molhabilidade.

Gangadharan *et al.* (2016) analisaram juntas brasadas de aço inoxidável austenítico com prata pura a diferentes temperaturas usando metal de adição à base de prata Ag-27Cu-5Sn. A partir de um ensaio de molhabilidade, foi observado baixa molhabilidade na superfície do aço inoxidável. A adição de um revestimento de Ni permitiu melhorar esta propriedade. Além disso, foram observadas quatro fases na junta sendo elas: solução sólida de prata, solução sólida de cobre, Cu₃Sn intermetálico e solução sólida de Ni-Fe. As juntas formadas a 820 °C não apresentaram Cu₃Sn, menos defeitos e maior zona de difusão assistida.

Ma *et al.* (2016) propuseram a um novo metal de adição à base de prata Ag-Cu-Zn-Sn-Ga investigando a influência do teor de Ga nas propriedades de mecânicas e microestrutura da junta brasada de latão ao aço inoxidável 304. Os resultados mostraram intensificação da molhabilidade, como também da resistência a oxidação e propriedades mecânicas. As microestruturas foram mais finas e uniformes com a adição de Ga, onde o sistema γ -Cu₅Zn₈ desapareceu quando o conteúdo de Ga chegou a cerca de 2 %. Adicionalmente, a resistência ao cisalhamento apresentou um 36,9 % maior do que em relação ao metal de adição comum (Ag-Cu-Zn-Sn).

Venkateswaran *et al.* (2017) estudaram os efeitos de diferentes temperaturas (835°C a 935°C), diferentes tempos (5 a 25 min) e diferentes espessuras de espessuras de filme (75 µm a 300 µm) usando Cu-37,5Ag-8Mn-5Zn para unir por brasagem um aço inoxidável martensítico ao aço inoxidável austenítico 321. As juntas brasadas a 910 °C por 15 min e usando filme de brasagem de 150 µm de espessura apresentou maior resistência ao cisalhamento de 213 MPa. A microestrutura do metal de brasagem consistiu em soluções sólidas rica em Cu e Ag variando a quantidade de Ag/Cu, Mn, Zn e Ni. Ademais, o uso do revestimento de titânio minimizou a penetração intergranular de metais de adição no metal de base.

Liu *et al.* (2018) estudaram os efeitos na molhabilidade, microestrutura e propriedades mecânicas da adição de nanofolhas de grafeno reforçadas (GNSs) em um metal de adição à base de prata (AgCuTi) para união de uma matriz de carbono compósita (compósito C/C) e Ti-6Al-4V. O aumento do teor de grafeno provocou uma redução da molhabilidade do metal de adição devido aquele dificultar o espelhamento dos elementos do metal de adição. Nas análises de MEV e DRX, a presença do grafeno foi verificado somente quando o teor alcançou 0,8 wt%. Com relação a resistência ao cisalhamento, foi observado que a junta com teor de grafeno de 0,3 wt% apresentou melhor desempenho mecânico.

Wang *et al.* (2018) buscaram desenvolver um metal de adição com alto conteúdo de Sn, modificando o metal de adição base BAg50CuZn e uma camada de Sn galvanizada. Os experimentos foram conduzidos por brasagem de indução para união de aço inoxidável 304 ao latão H62. Na análise microestrutural das juntas brasadas foi identificado uma fase rica em Ag, fase rica em Cu e uma solução composta de CuZn. Quando o conteúdo de Sn na camada galvanizada estava entre 6 e 7,2 % precipitaram as fases Cu_5Zn_8 , $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ e Ag_3Sn na junta brasada. As propriedades mecânicas melhoraram quando comparadas com o metal de adição BAg50CuZn. No entanto, quando o conteúdo de Sn excede 6 %, a junta apresentou mecanismos de fratura frágil junto com um dúctil, sendo predominante a região com comportamento frágil.

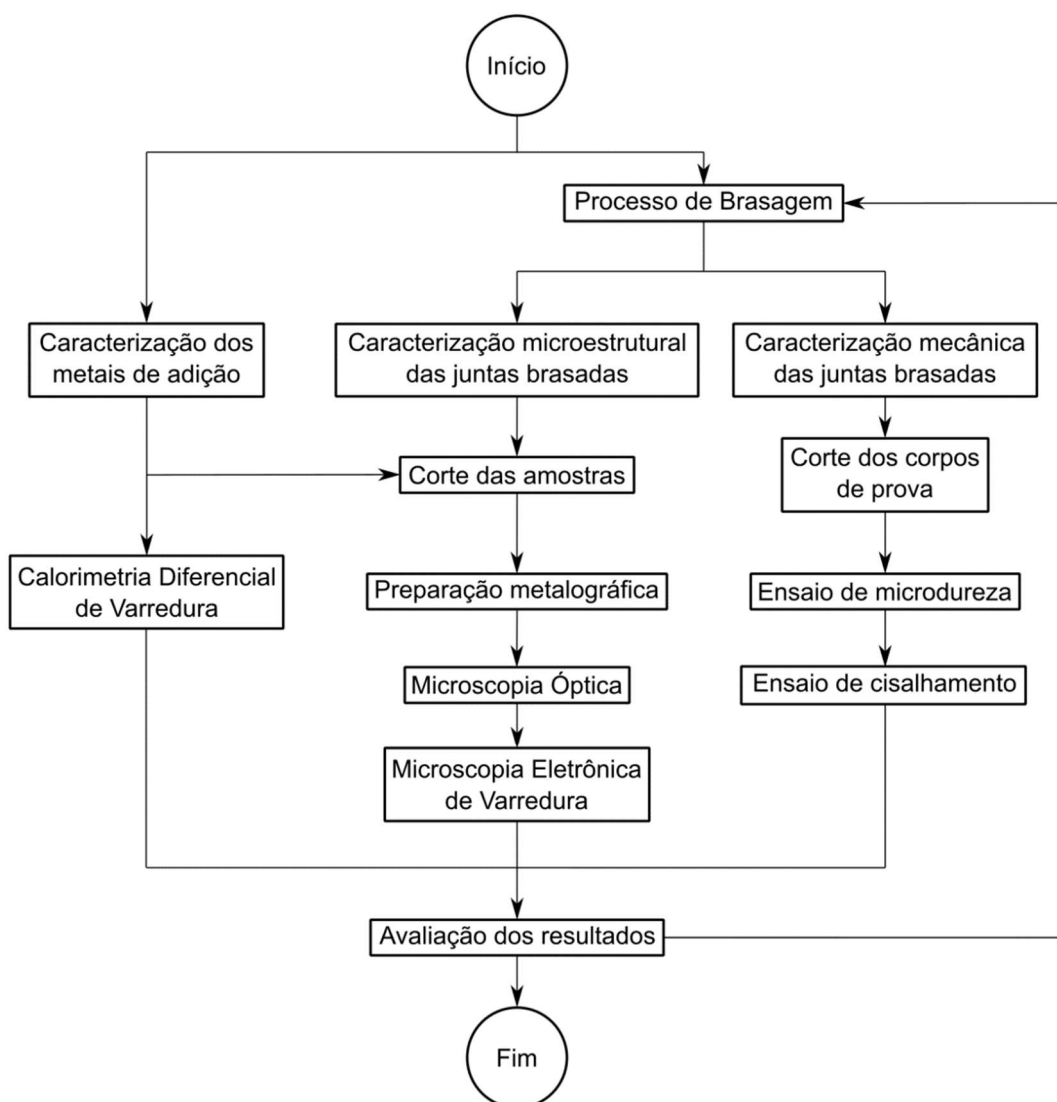
Xue *et al.* (2019) desenvolveram um metal de adição com baixo conteúdo de prata com adição de Ga e Ce. A brasagem foi realizada usando forno de indução para unir um aço inoxidável 304 com latão H62. Os autores estudaram ainda o efeito do envelhecimento nas propriedades da junta brasada. As análises de MEV mostraram a presença de uma fase rica em Ag, solução sólida de Cu e uma fase composta de CuZn. Além disso, foi verificado que o processo de envelhecimento diminuiu a penetração intergranular do metal de adição no metal de base e favoreceu o aumento da resistência mecânica. A junta brasada com a adição de Ga e Ce apresentou desempenho mecânico superior em relação a liga $\text{Ag}_{16,5}\text{CuZnSn}$.

Wu *et al.* (2021) buscaram desenvolver um metal de adição com baixo conteúdo de prata com adição de In (12AgCuZnSn-xIn). Foi utilizada a brasagem por chama para promover a união de chapas de aço inoxidável 304 e cobre. A partir dos ensaios de calorimetria de varredura diferencial e molhabilidade foi observado que a adição de In tende a reduzir o intervalo de fusão da liga e melhorar o espalhamento sobre o substrato sólido de aço inoxidável 304 e cobre. Os resultados de DRX dos metais de adição mostraram que a partir de 5% de conteúdo de In ocorre a formação de intermetálicos (Cu_4In e Ag_9In_4), estes que podem prejudicar o desempenho mecânico da junta. As análises de MEV revelaram que as juntas brasadas eram compostas das fases: solução sólida de Cu e solução sólida de Ag. Nos ensaios mecânicos, a junta brasada com metal de adição contendo 1% de teor de In apresentou maior resistência. Em teores superiores a 1% de In houve redução do desempenho mecânico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais adotados, como pode ser visto de forma esquemática no fluxograma apresentado na Figura 7. Inicialmente, foram especificados os materiais e os equipamentos utilizados nas etapas de fabricação das amostras, análise por microscopia e dos corpos de prova para ensaios mecânicos. Posteriormente, foram descritos os procedimentos utilizados para fabricação das juntas brasadas. Por último, foram caracterizados os métodos empregados para análise macro, microestrutural e mecânica.

Figura 7 - Fluxograma do procedimento experimental usado no estudo



Fonte: O autor (2021).

4.1 METAL DE BASE

O material de base usado para fabricação das juntas brasadas consistiram em chapas de aço de inoxidável 304 laminadas a quente, com espessura de 3 mm, fornecidas pelo fabricante Açotubo (Brasil). Esse material apresenta temperatura *solidus* de 1400°C e temperatura *liquidus* de 1455°C. A composição química da chapa de aço inoxidável é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química do aço inoxidável 304

Liga	Composição (%)							Outros
	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	
304	0,05	0,05	18,3	8,1	0,3	1,8	0,45	0,001 S / 0,03 P / 0,3 Cu

Fonte: Adaptado de Açotubo (2020).

4.2 METAIS DE ADIÇÃO

Foram utilizados metais de adição à base de prata para promover a união do metal de base. Os metais de adição apresentam teores de prata de 25%, 35% e 45%, fornecidos pelo fabricante Rhomos indústria (Brasil). Os metais de adição foram fornecidos na forma de varetas com 1,5 mm de diâmetro. A Tabela 7 apresenta a norma seguida, a composição química e o intervalo de fusão dos metais de adição comerciais utilizados.

Tabela 7 - Composição química e intervalo de fusão dos metais de adição à base de prata

Liga	Norma	Composição (%)				Intervalo de fusão (°C)
		Ag	Cu	Zn	Sn	
25% Ag	DIN EN1044Ag205	25	40	35	-	700 – 790
35% Ag	DIN EN1044Ag106	35	36	27	2,0	630 – 730
45% Ag	DIN EN1044Ag104	45	27	25,5	2,5	640 – 680

Fonte: Adaptado de DIN EN 1044 (1999) e Rhomos Indústria (2020).

4.3 FLUXO

Foi utilizado um fluxo comercial denominado BR45, o qual é utilizado especificamente para brasagem com metais de adição à base de prata, sendo fornecido na forma de pasta pelo fabricante Brasil soldas (Brasil). A Tabela 8

apresenta a faixa de temperatura, o metal de adição recomendado e a aplicação básica indicada para esse tipo de fluxo.

Tabela 8 - Características do fluxo para brasagem com metais de adição à base de prata

Fluxo	Norma	Formato	Metal de Adição	Aplicação básica	Faixa de Atuação (°C)
BR45	-	Pasta	Prata e suas ligas	Ferramentas especiais	550 – 950

Fonte: Adaptado de Brasil Soldas (2019).

4.4 FABRICAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS COM ÓXIDO DE GRAFENO

O óxido de grafeno usado no presente trabalho foi sintetizado baseado no método de Hummers e Offeman (1958) no procedimento estabelecido no trabalho de Marques (2021). A deposição do óxido de grafeno nos metais de adição com 25% de prata foi realizada pelo processo de deposição por imersão (*dip-coating*). Foi preparada uma solução de 5,5 g/L de GO em etanol e os consumíveis foram imergidos por três vezes na solução. Após o processo de deposição, foram armazenados a temperatura ambiente. O metal de adição com 25% de prata foi escolhido por ser a melhor opção em termos de custos, visto que não faria sentido adicionar um elemento de maior valor agregado a um consumível com elevado teor de prata, este que já apresenta um custo alto.

4.5 CALORIMETRIA DE VARREDURA DIFERENCIAL

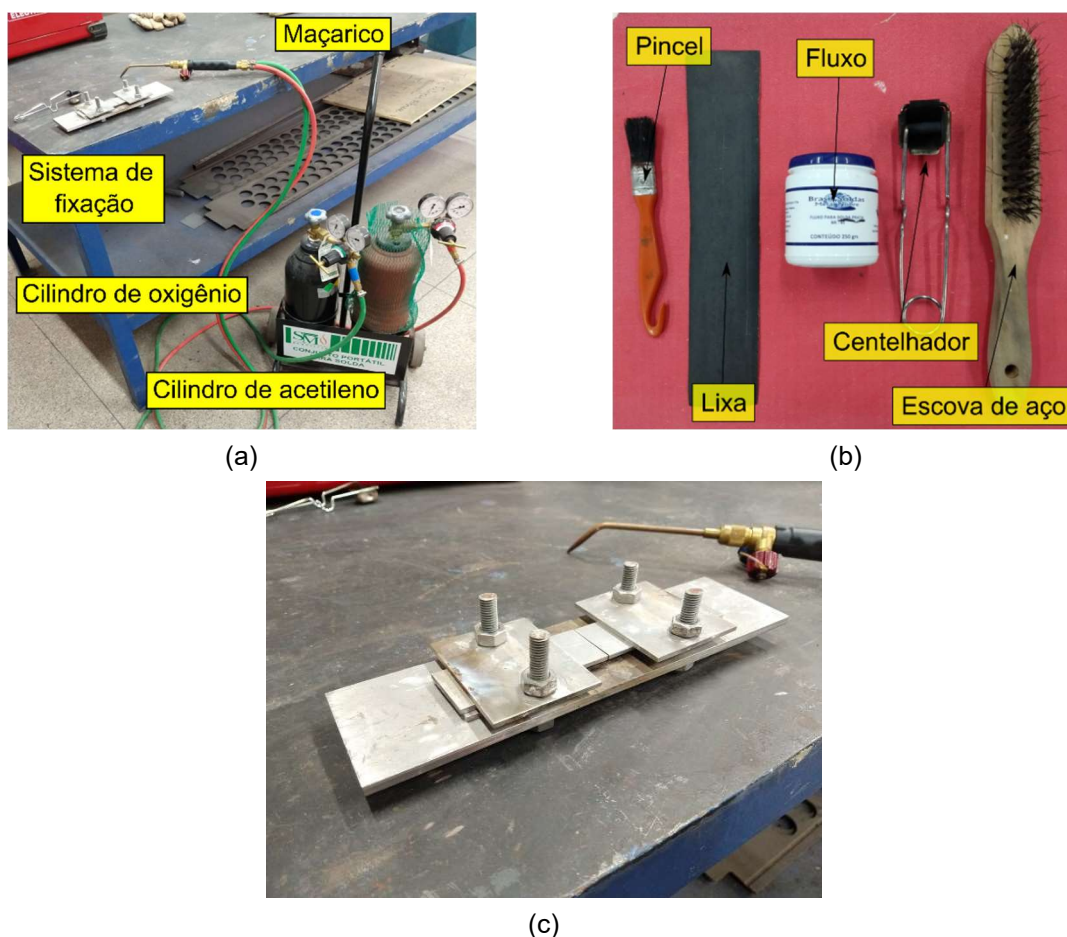
Os metais de adição foram submetidos ao ensaio de calorimetria de varredura diferencial para avaliar seu comportamento térmico. As varetas foram cortadas em tamanhos com massa de aproximadamente 36 mg. O ensaio foi realizado em um analisador térmico simultâneo Netzsch STA 449 F3 (Alemanha), disponível no laboratório de análises térmicas do Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM-UFPE), usando nitrogênio como gás protetivo, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min e temperatura final de 850°C. Um cadinho de alumina vazio foi usado como material de referência para a curva de correção dos ensaios.

4.6 PROCESSO DE BRASAGEM

4.6.1 Equipamentos e Layout do Processo

O processo de brasagem foi realizado usando um conjunto portátil PPU da fabricante SM indústria (Brasil), onde o aquecimento é promovido pela queima de uma mistura de gases acetileno e oxigênio. A brasagem foi realizada na posição horizontal plana e o metal de adição foi adicionado manualmente na região da junta. A Figura 8 (a) apresenta o arranjo experimental do processo de brasagem, onde tem-se também o metal de base, que é posicionado e fixado usando o porta-amstras.

Figura 8 - Detalhes do sistema usado para brasagem: (a) Arranjo experimental do processo; (b) Materiais auxiliares usados na brasagem; e (c) Porta-amstras



(c)
 Fonte: O autor (2021).

A Figura 8 (b) apresenta todos os materiais descritos e que foram usados nos experimentos. Dentre os materiais utilizados para auxiliar no processo tem-se o

centelhador, que é responsável por promover a ignição para acender o maçarico; o fluxo, que é responsável por melhorar a molhabilidade e retardar a formação da camada passiva do aço inoxidável durante o processo; o pincel, que usado para auxiliar na aplicação do fluxo na junta; a lixa e a escova de aço, que podem ser utilizadas no processo de pré-limpeza para remoção de óxidos e impurezas e pós-brasagem para remoção do fluxo e de impurezas que tenham sido depositadas na superfície metálica no decorrer do processo.

4.6.2 Procedimento de Brasagem

A fabricação das juntas brasadas seguiu um procedimento que envolveu cinco etapas principais: pré-limpeza, preparação da junta, ajuste da tocha e aquecimento da junta, aplicação do metal de adição e pós-limpeza. Todo o procedimento de brasagem seguiu as recomendações da norma de qualificação e procedimento de brasagem AWS B2.2/B2.2M (2010). A seguir, é descrito com detalhes cada uma das etapas apresentadas acima.

Na primeira etapa, as chapas foram cortadas nas dimensões requeridas para fabricação das amostras de microscopia e corpos de provas para ensaios mecânicos. Em seguida, foi realizada a remoção de rebarbas provenientes do processo de corte usando uma lixadeira de cinta. Na sequência, realizou-se o lixamento das superfícies da chapa usando lixas d'água, visando remover impurezas e a camada passiva de óxido que se forma em aços inoxidáveis.

Na segunda etapa, para o caso de juntas de topo, as juntas foram posicionadas na posição de brasagem. Antes da montagem propriamente dita o fluxo foi aplicado nas superfícies da área a ser brasada usando um pincel para auxiliar a aplicação. Em seguida, o maçarico foi ligado usando a ignição proveniente de um centelhador e a chama foi ajustada pelo controle da vazão de oxigênio e acetileno, onde foi utilizada a chama neutra, como recomendado na seção 3.4.3. Outros tipos de chama foram utilizados no trabalho para melhor entendimento de seu efeito para o sistema estudado.

Na terceira etapa, foi realizado o aquecimento dos componentes, onde foi aplicada a chama em uma região adjacente a junta. O aquecimento foi realizado até o fluxo sobre a chapa começar a borbulhar e apresentar uma aparência completamente fluida e transparente. Em seguida, a chama foi conduzida para a

região da junta, que foi aquecida até o fluxo apresentar o mesmo comportamento descrito anteriormente e então foi realizado um movimento de vai e vem com a chama para manter a temperatura uniforme em todo o componente.

Na quarta etapa, o metal de adição foi alimentado na junta até o momento em que sofreu fusão e a junta foi completamente preenchida. A junta e o metal de adição foram mantidos aquecidos com o movimento de vai e vem da chama durante todo o processo, evitando aplicar a chama diretamente no metal de adição. Na etapa final, após a brasagem ter sido concluída, a junta foi limpa removendo os resíduos de fluxo com uma lixa e quando necessário uma escova de aço.

4.6.3 CONDIÇÕES DE BRASAGEM

Todas as juntas brasadas para análise microestrutural foram produzidas a partir de peças do metal de base com dimensões de 35 mm x 35 mm. Inicialmente foram consideradas três condições de brasagem, as quais correspondem aos três metais de adição disponíveis que são: 25% Ag, 35% Ag e 45% Ag. Essa avaliação inicial configurou os testes preliminares que foram realizados usando um espaçamento da junta aproximado de 1 mm. Além disso, foi utilizado uma lixa de 220 *meshes* para preparação superficial do metal de base. As amostras dos ensaios preliminares foram cortadas no centro do comprimento da junta para avaliação da seção transversal.

Em seguida, foram realizados os testes finais e foram consideradas quatro condições de brasagem, onde além dos três metais de adição disponíveis foi utilizado o metal de adição de 25% Ag com a adição de óxido de grafeno. Os ensaios finais foram realizados com espaçamentos da junta de aproximadamente entre 0,2 mm e 0,5 mm como indicado por Roberts (2013). Na preparação superficial do metal de base foi utilizado uma lixa de 1000 *meshes* para verificar a influência da rugosidade superficial. Nos ensaios finais foram produzidas duas juntas brasadas para cada condição e em cada junta foi retirada duas amostras para avaliação da seção transversal e análise microestrutural. A Tabela 9 apresenta os parâmetros gerais utilizados em cada uma das condições de brasagem usadas para conduzir os experimentos.

Tabela 9 - Parâmetros do processo de brasagem

Metal de adição	Tipo de chama	Alimentação	Preparação	Posição
25% Ag	Neutra	Manual	Mecânica	Plana
35% Ag	Neutra	Manual	Mecânica	Plana
45% Ag	Neutra	Manual	Mecânica	Plana
25% Ag GO	Neutra	Manual	Mecânica	Plana

Fonte: O autor (2021).

Também foi realizada uma análise para verificar qual a influência do tipo de chama para brasagem em termos da qualidade da junta. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizado em cada umas das condições do teste do tipo chama, onde foram avaliadas as chamas do tipo neutra, carburante e oxidante para o metal de adição com 25% Ag. Neste teste foi produzida apenas uma junta brasada para cada condição, sendo realizado um corte no centro do comprimento da junta para avaliação do preenchimento a partir da seção transversal.

Tabela 10 - Parâmetros para o teste do tipo de chama

Tipo de chama	Metal de adição	Alimentação	Preparação	Posição
Neutra	25% Ag	Manual	Mecânica	Plana
Carburante	25% Ag	Manual	Mecânica	Plana
Oxidante	25% Ag	Manual	Mecânica	Plana

Fonte: O autor (2021).

4.7 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA JUNTA BRASADA

4.7.1 Preparação das Amostras

Na etapa de preparação metalográfica, as chapas foram cortadas na direção longitudinal, de modo que a seção transversal correspondesse a região da interface da parede das duas chapas e o metal de adição. Foi utilizado um equipamento de corte semiautomático, modelo DiscoTom – 10 da fabricante STRUERS (Dinamarca). As amostras foram embutidas para facilitar o manuseio no processo de lixamento e polimento. As amostras foram embutidas a quente utilizando baquelite.

Em seguida, as amostras tiveram suas superfícies preparadas usando lixadeira/politriz metalográfica modelo Aropol 2V da fabricante Arotec (Brasil). Foram utilizadas lixas com sequência granulométrica de 100, 220, 400, 800, 1200 e 1500 *meshes*. As amostras foram rotacionadas em 90° na troca de cada lixa.

Posteriormente, as amostras foram polidas usando um tecido macio aplicando lubrificante a base de álcool e pasta de diamante com tamanho médio de partícula de 1 μm .

Uma vez obtida a superfície totalmente polida, o material foi submetido ao ataque químico visando obter diferenciação entre a microestrutura da região brasada e a microestrutura do metal de base. A solução utilizada foi: 5mL de hidróxido de amônio (NH_4OH), 25mL de água deionizada (H_2O) e 25mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) durante um tempo médio de 4 s, usado para revelar a microestrutura do metal de adição. Por fim, a região atacada foi limpa com água destilada e secada cuidadosamente com um secador térmico.

4.7.2 Microscopia Óptica

Após a revelação da microestrutura das amostras, a aquisição de imagens foi feita utilizando um microscópio óptico modelo AXIO LAB A1, disponível no laboratório de microscopia do INTM-UFPE, acoplado com câmera digital Axiocam 105 color da fabricante Zeiss (Alemanha), Figura 9. Foi utilizado o software Zeiss Blue, associado ao microscópio, para manipulação de resolução e contraste das imagens. Foram visualizadas as microestruturas das regiões da interface entre a zona brasada e o metal de base.

Figura 9 - Microscópio óptico utilizado acoplado com câmera digital

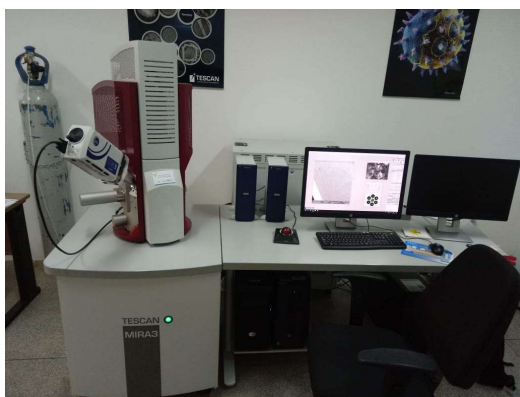


Fonte: O autor (2021).

4.7.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras foram submetidas a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) após o polimento. Para observação das microestruturas foram utilizadas imagens de elétrons retroespalhados (BSE). Por meio desta técnica é possível identificar e obter informações das fases em relação a sua diferença de contraste, onde esta diferença de contraste vem em função do número atômico dos elementos presentes nas diversas fases. Além disso, foi realizada uma análise química de elementos metálicos das fases por meio da análise de espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (EDS), acoplada ao MEV. Para isto, foi utilizado o equipamento da fabricante TESCAN (República Tcheca), disponível no laboratório de microscopia eletrônica de varredura do INTM-UFPE, modelo MIRA3 acoplado com espectrômetro de energia dispersiva EDS Oxford Instruments X-act, com fonte de emissão de elétrons FEG, apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado



Fonte: O autor (2021).

4.7.4 Difração de Raios-X

Para auxílio da identificação das fases presentes na região da junta brasada foi utilizada a técnica de DRX. A análise foi realizada nas amostras com as superfícies polidas. O equipamento utilizado foi um difratômetro marca MAXima_X XRD-7000 da fabricante Shimadzu (Japão), Figura 11, disponível no laboratório de difração de raios-x do INTM-UFPE. O equipamento opera com radiação Cu-K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), corrente de 30 mA, tensão aplicada de 40 kV e passo de varredura angular de $1^\circ/\text{min}$ compreendendo uma faixa de ângulo de varredura (2θ) entre 5° e 110° .

Figura 11 - Equipamento utilizado para análise de difração de raios-X



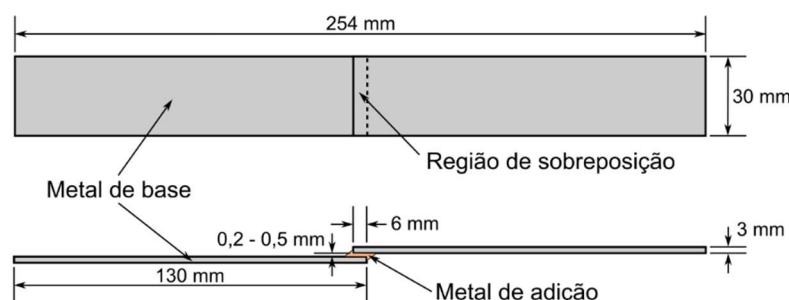
Fonte: O autor (2021).

4.8 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA JUNTA BRASADA

4.8.1 Ensaio de Resistência ao cisalhamento

As chapas foram brasadas em dimensões próximas ao indicado pela norma para o corpo de prova e, em seguida, foi realizado o processo de corte para ajuste das dimensões finais. Foram produzidos três corpos de prova para cada uma das condições especificadas na Tabela 9, seguindo as recomendações da norma AWS C3.2/C3.2M (2008). Os corpos de prova foram fabricados seguindo as dimensões recomendadas para ensaios mecânicos em amostra do tipo chapa, conforme o item 4.2.3.1 da norma AWS C3.2/C3.2M (2008). A Figura 12 apresenta o esquema usado para guiar o projeto para fabricação dos corpos de prova, onde tem-se as dimensões do corpo de prova.

Figura 12 - Projeto do corpo de prova para ensaio de resistência ao cisalhamento



Fonte: O autor (2021).

O ensaio de tração foi realizado, à temperatura ambiente (25 °C), usando a máquina de ensaios mecânicos DL10000 da fabricante EMIC (Brasil), disponível no laboratório de ensaios mecânicos do departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC-UFPE), usando uma célula de carga com capacidade de 100 kN, Figura 13. Os corpos de prova foram fixados nas extremidades por meio de mandíbulas em V. A distância entre as garras foi de aproximadamente 133,3 mm e a velocidade do cabeçote foi de 2 mm/min. Finalmente, assegurou-se, durante a fixação, que a junta brasada foi posicionada perpendicularmente ao eixo de deslocamento do equipamento.

Figura 13 - Equipamento utilizado para realização do ensaio resistência ao cisalhamento



Fonte: O autor (2021).

4.8.2 Ensaio de Microdureza Vickers

Para determinação dos valores de microdureza nas diferentes regiões da junta brasada (metal de base, camada de reação e metal de adição), foi realizado o ensaio

de microdureza Vickers a partir de um microdurômetro da fabricante Emcotest (Austria), disponível no laboratório de microscopia do INTM-UFPE, modelo DuraScan G5, Figura 14.

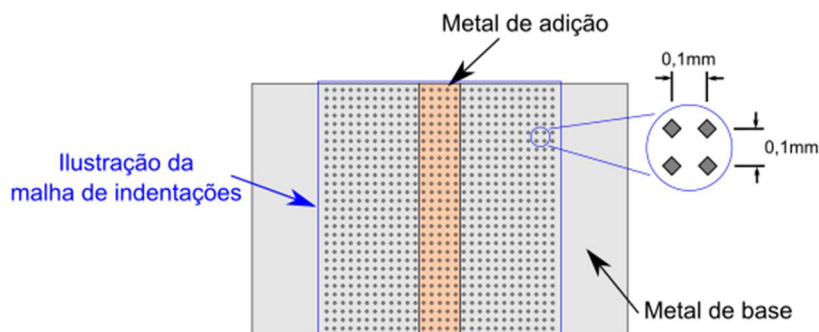
Figura 14 - Equipamento utilizado para medições de microdureza Vickers



Fonte: O autor (2021).

As medições de dureza foram realizadas na seção transversal dos três corpos de prova removidos de diferentes regiões de cada amostra, conforme recomendações da ASTM E384-17 (2017). A carga aplicada pelo indentador foi de 0,1 kgf, por um período de 15 s e a distância entre as indentações foi de 0,1 mm. A distância entre as indentações está acima do valor mínimo de espaçamento calculado a partir da norma ASTM E384-17 (2017). Foram realizadas medições de microdureza em mapa da região da junta brasada. A Figura 15 apresenta, esquematicamente, a posição das indentações das medições no mapa.

Figura 15 - Esquema para realização do mapa de microdureza



Fonte: O autor (2021).

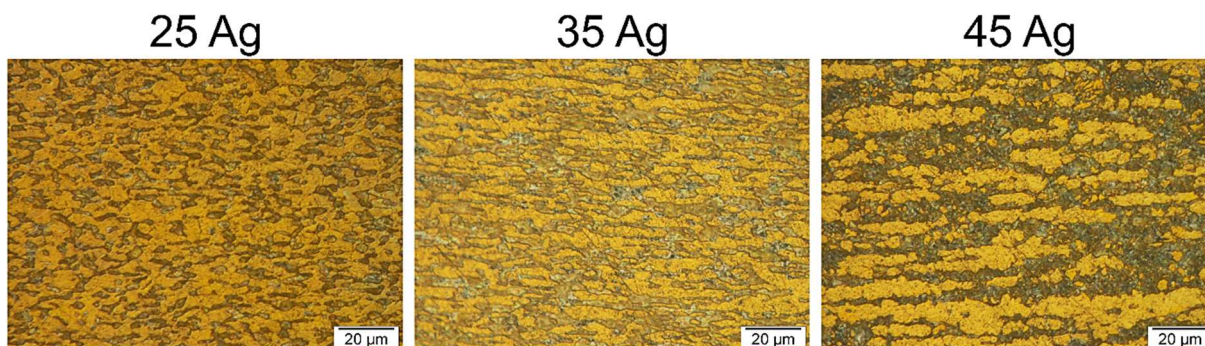
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DOS METAIS DE ADIÇÃO

5.1.1 Análise por Microscopia

Para avaliar as condições microestruturais das varetas de metal de adição como recebido, amostras foram embutidas e preparadas. Logo após, foi realizado o ataque químico, com a mesma solução usada nas juntas brasadas, para revelar as microestruturas presentes. O metal de adição com 25% Ag GO não foi incluído nessa avaliação porque o GO é depositado apenas na superfície da vareta de metal de adição, e, portanto, não era esperado que ocorressem mudanças microestruturais internas. A Figura 16 apresenta as micrografias obtidas por Microscopia Óptica (MO) para os metais de adição contendo 25%, 35% e 45% Ag.

Figura 16 - Micrografias dos metais de adição contendo 25%, 35% e 45% Ag como recebido obtidas por MO

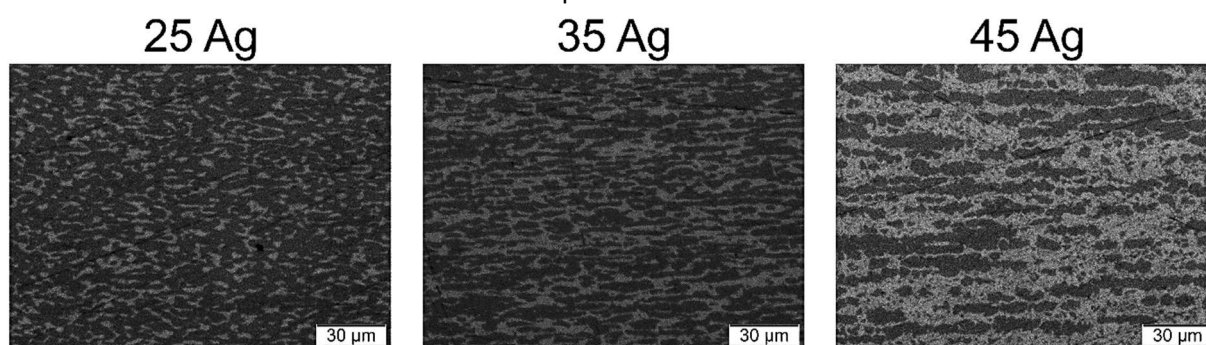


Fonte: O autor (2021).

Analisando as micrografias da Figura 16 observa-se que as microestruturas estão direcionadas no sentido de extrusão das varetas, que seria no eixo horizontal das imagens. O desenvolvimento desse tipo de microestrutura se deve ao processo de conformação usado na fabricação. Além disso, verifica-se que o microconstituente claro diminui de quantidade à medida que o teor de prata no metal de adição aumenta, o que indica que esta pode ser uma fase rica em cobre e o microconstituente escuro uma fase rica em prata. Um outro indicativo das fases é o contraste de cores, que são semelhantes ao observado por Siqueira *et al.* (2021), que estudou metais de adição à base de prata com cádmio para união de tubos de cobre utilizando o mesmo ataque

químico do presente trabalho. No trabalho, foi constatado que o microconstituente claro e escuro são fases ricas em cobre e prata, respectivamente. Para corroborar as fases presente nos microconstituintes claro e escuro, foi realizada uma análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando o sinal de elétrons retroespalhados, os quais permitem uma imagem com contraste químico, resultando em variação de tons de cinza desde claro (elemento com maior número atômico) a escuro (elemento de menor número atômico). A Figura 17 apresenta micrografias obtidas através de uma análise de Elétrons Retroespalhados (BSE).

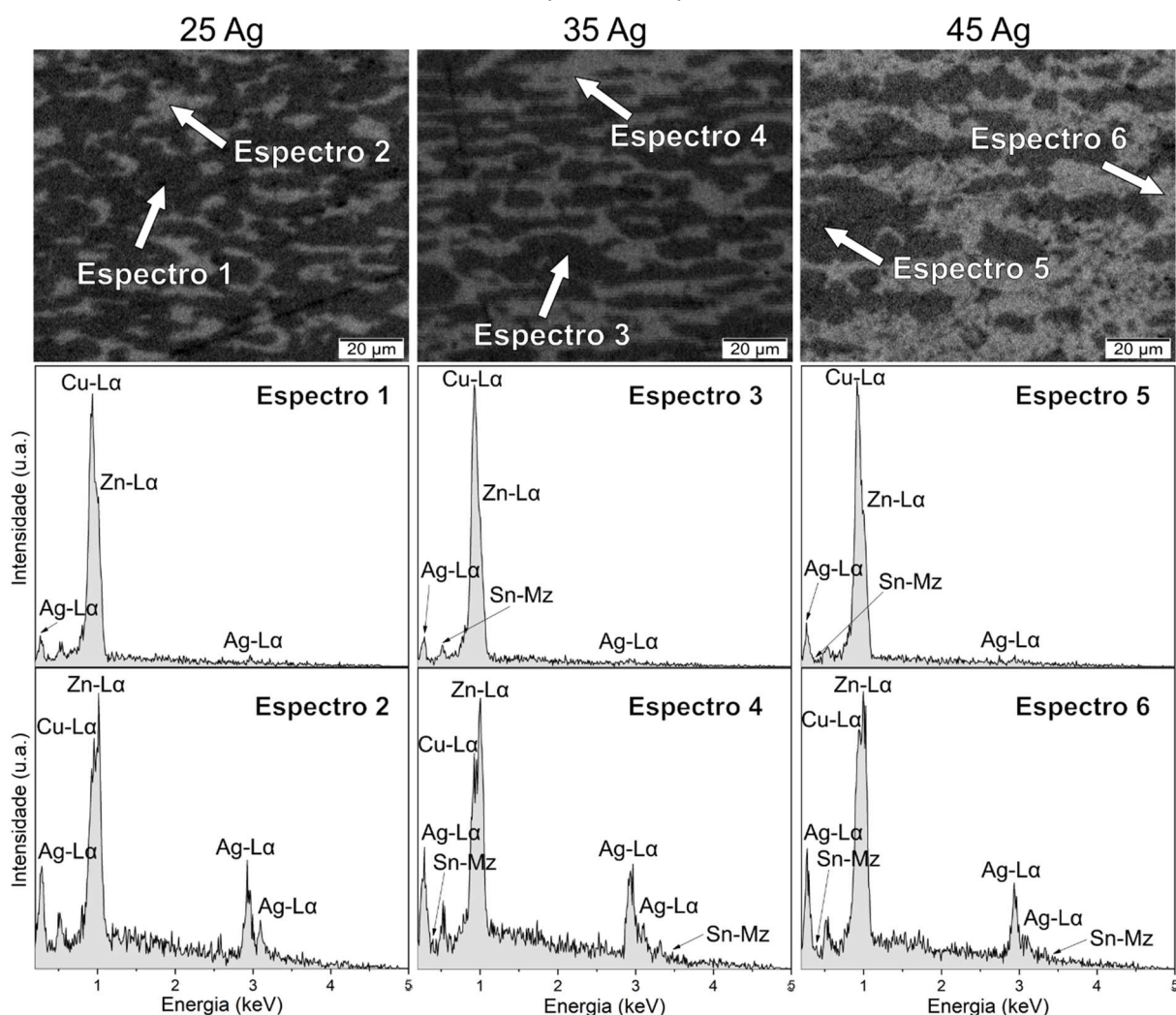
Figura 17 - Micrografias dos metais de adição contendo 25%, 35% e 45% Ag como recebido obtidas por MEV



Fonte: O autor (2021).

Como observa-se na Figura 17, tem-se a presença de uma fase mais clara e outra mais escura, onde a fase escura diminui à medida que o teor de prata no metal de adição aumenta, o que indica que ela é representada pelo microconstituente rico em cobre na Figura 16, reforçando que esta é uma fase rica em cobre. Uma vez que o cobre apresenta menor núcleo atômico que a prata, este aparece com um contraste mais escuro na análise de BSE por difratar uma menor quantidade de elétrons. Além disso, a quantização da fase rica em prata nas micrografias acima mostra que sua porcentagem em relação a fase rica cobre para as condições 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag, é de 31,7%, 40,7% e 51,4%, respectivamente. Para apresentar uma análise quantitativa das fases presentes em cada metal de adição, foi realizada ainda uma análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Foram coletados pontos na fase rica em cobre e fase rica em prata de cada metal de adição. A Figura 18 apresenta a localização das análises de ponto por EDS e os espectros obtidos. A Tabela 11 apresenta os valores quantitativos da composição química obtida para cada espectro indicado na Figura 18.

Figura 18 - Micrografias indicando os pontos de análise por EDS para cada um dos metais de adição e seus respectivos espectros



Fonte: O autor (2021).

Tabela 11 - Dados quantitativos obtidos na análise química e as possíveis fases para os espectros nos metais de adição 25%, 35% e 45% Ag

Espectro	Composição (wt%)				Fase presente
	Ag	Cu	Zn	Sn	
1	6,7	51,5	41,8	0,0	Solução sólida de Cu
2	55,8	11,1	33,1	0,0	Solução sólida de Ag
3	7,8	55,8	32,4	4,0	Solução sólida de Cu
4	65,2	8,6	26,2	0,0	Solução sólida de Ag
5	5,3	58,2	36,5	0,0	Solução sólida de Cu
6	51,5	12,1	36,4	0,0	Solução sólida de Ag

Fonte: O autor (2021).

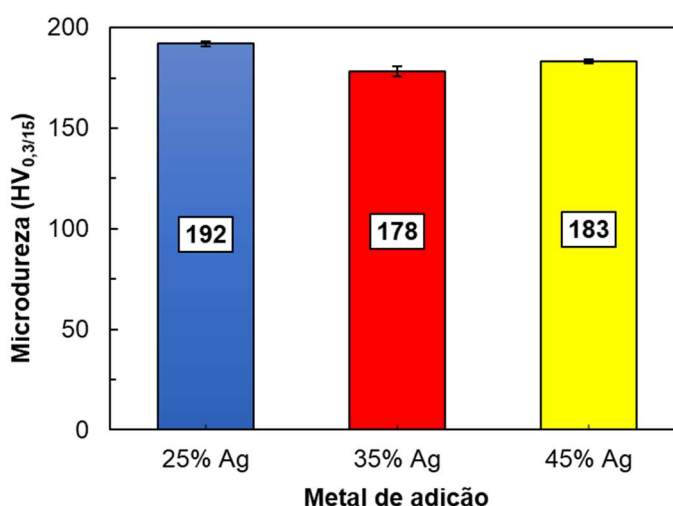
Tabela 11 apresenta os resultados quantitativos obtidos na composição química dos espectros de EDS em cada metal de adição. Os resultados obtidos nas

fases ricas em cobre e prata já confirmam o que foi observado com a análise de BSE. A fase escura apresenta uma solução sólida rica em Cu e Zn e a fase clara apresenta uma solução sólida rica em Ag e Zn. Nota-se ainda que não foi possível detectar a presença de Sn na liga 45% Ag, elemento que está presente em maior proporção na composição desse metal de adição do que na liga 35% Ag. De toda forma, é esperado que as fases obtidas na Tabela 11 estejam presentes na junta brasada junto com elementos do metal de base na composição.

5.1.2 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza foi realizado nas varetas de metal de adição como recebido visando estabelecer uma relação com as condições após a brasagem. Foram feitas 10 (dez) indentações em cada condição de metal de adição. Apesar de provavelmente os valores de microdureza serem maiores nessa análise devido ao processo de conformação das varetas, pode-se avaliar de maneira comparativa os metais de adição observando se após a brasagem algum deles vai apresentar desempenho superior ou inferior aos outros em relação a condição de como recebido. A Figura 19 apresenta os valores de microdureza obtidos em cada condição.

Figura 19 - Valores de microdureza Vickers para cada metal de adição como recebido



Fonte: O autor (2021).

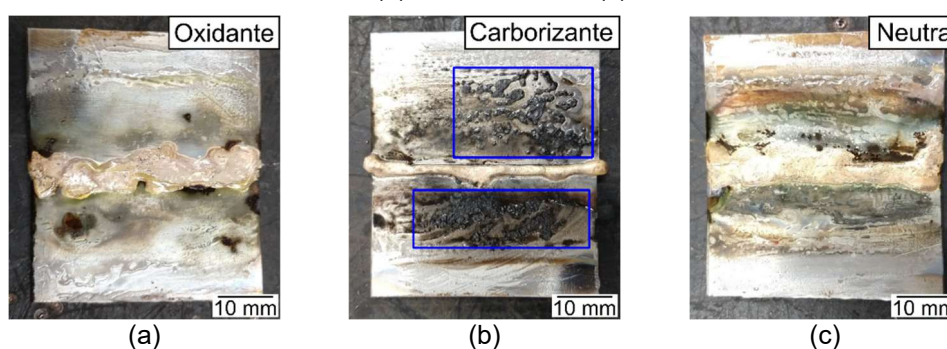
A partir dos resultados de microdureza da Figura 19 tem-se que o metal de adição com 25% Ag apresenta valores superiores. Wierzbicki *et al.* (2011) reportaram

que o aumento do teor de Sn no metal de adição provoca um aumento considerável da dureza. Isso explica o aumento de dureza que ocorre da condição de 45% em relação a 35%, que apresentam 2,5% e 2,0% de conteúdo de Sn, respectivamente. Em contrapartida, ambas as condições apresentam durezas inferiores ao metal de adição com 25% de prata, o que indica que o aumento no teor de prata no metal de adição provoca uma redução da dureza média do material. No caso, o metal de adição com 45% de prata apresenta maior dureza em relação ao 35% porque a adição de Sn deve ter provocado um efeito de aumento de dureza superior ao efeito de redução provocado pelo aumento do teor de prata.

5.2 INFLUÊNCIA DO TIPO DE CHAMA

O teste do tipo de chama foi realizado para verificar qual a influência da variação dos parâmetros da mistura dos gases no preenchimento da junta promovido pelo metal de adição. Optou-se por usar as chamas do tipo carborizante, neutra e oxidante, por serem as mais conhecidas no processo de brasagem oxiacetilênica (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991; SCHWARTZ, 2003). A Figura 20 apresenta as superfícies do topo das juntas imediatamente após a brasagem para cada condição de chama estudada.

Figura 20 - Topo das juntas imediatamente após a brasagem para diferentes tipos de chama: (a) Oxidante; (b) Carborizante e (c) Neutra

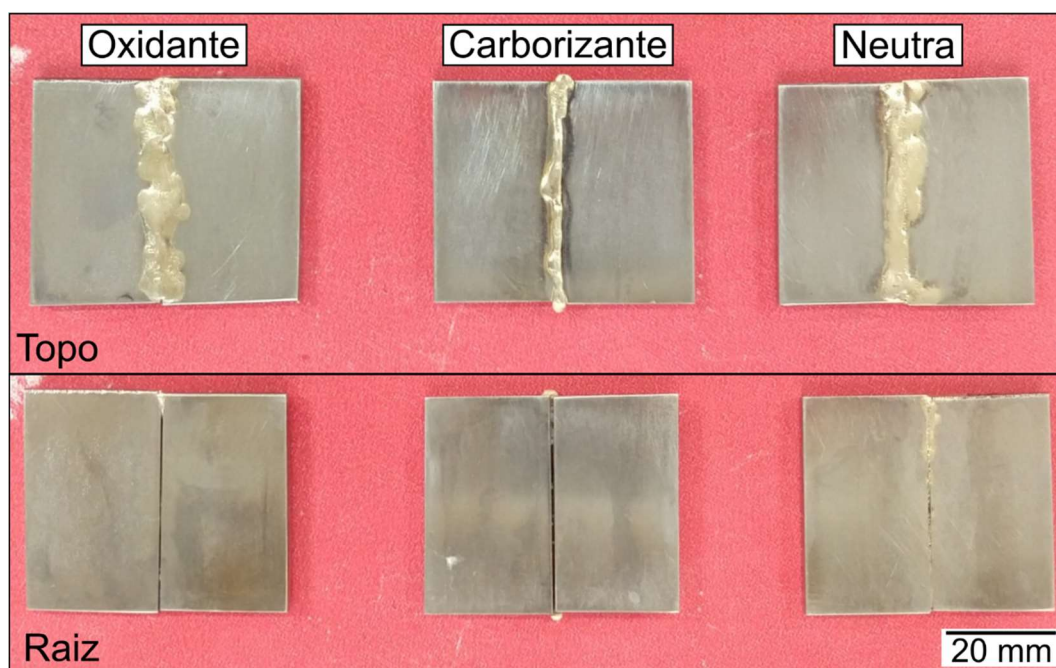


Fonte: O autor (2021).

A partir da Figura 20 (a), observa-se que na condição carborizante, o excesso de acetileno promoveu a queima do fluxo, o que gerou resíduos escuros que podem ser observados ao redor da junta brasada, identificado pelos contornos em azul. Para a condição neutra houve um espalhamento adequado do metal de adição ao longo de

toda a junta a brasada. Já para a condição oxidante, notou-se uma maior dificuldade para o espalhamento do metal de adição no momento da brasagem. A Figura 21 apresenta o topo e a raiz das juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza.

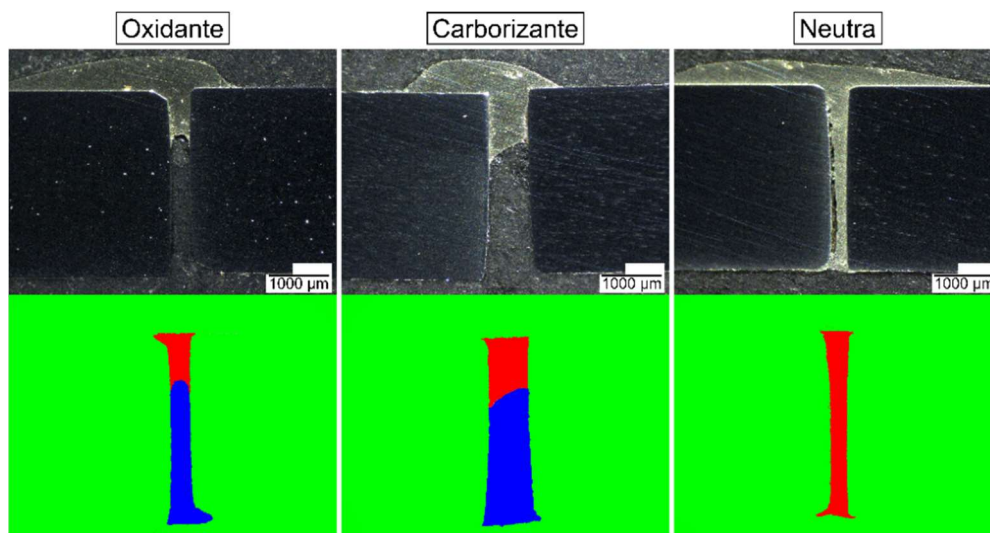
Figura 21 - Topo e raiz das juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza para diferentes tipos de chama



Fonte: O autor (2021).

Analisando o topo das juntas brasadas na Figura 21, nota-se que a condição carborizante apresentou uma molhabilidade bem baixa, o que pode ser inferido devido ao pouco espalhamento do metal de adição, visto sua menor capacidade de preencher a abertura da junta. Além disso, observando a raiz nota-se que as condições de chama oxidante e carborizante não apresentaram preenchimento completo em quase toda a extensão da junta brasada. Em contrapartida, a condição de chama neutra promoveu preenchimento completo em quase toda a extensão da junta brasada. Foram feitas macrografias da seção transversal e a partir destas foi realizado um tratamento de imagem por contraste de tons de cinza da junta brasada visando obter dados quantitativos do preenchimento, Figura 22.

Figura 22 - Macrografias das juntas brasadas para diferentes tipos de chama



Fonte: O autor (2021).

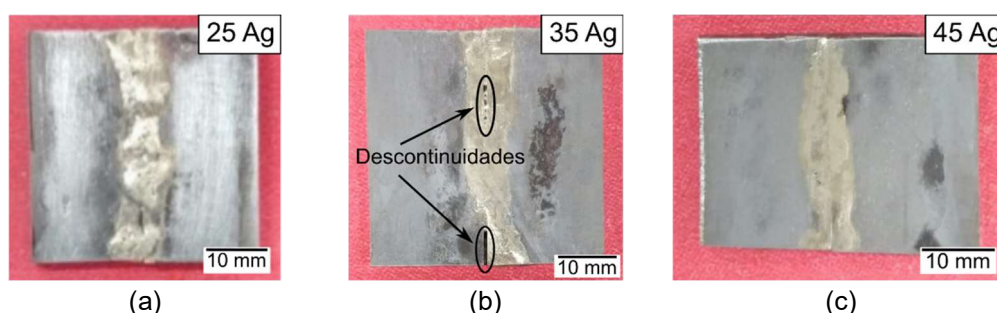
A partir da observação da seção transversal das juntas brasadas é possível avaliar melhor o preenchimento proporcionado por cada uma das condições de chama. A condição carborizante apresentou 28,9% de preenchimento, a condição neutra apresentou 100% de preenchimento e a condição oxidante apresentou 27,7% de preenchimento. O baixo preenchimento da condição carborizante se deve a ela queimar o fluxo de brasagem, Figura 20 (a), impedindo que ele desempenhe sua função e gerando resíduos que prejudicam a molhabilidade do metal de adição. Já para a condição oxidante, o baixo preenchimento deve estar relacionado a essa chama promover uma maior formação de óxidos no substrato metálico, onde esses óxidos agem como barreira ao espalhamento do metal de adição, motivo pelo qual esse tipo de chama não é muito indicado para brasagem (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Por fim, a condição neutra, como esperado, é a que apresenta melhor preenchimento, o que se deve a ela dificultar a formação de óxidos e não prejudicar o fluxo de brasagem. Além disso, a chama neutra pode ser usada quando o excesso de carbono pode ser prejudicial à junta brasada (SCHWARTZ, 2003).

5.3 INSPEÇÃO VISUAL DAS JUNTAS BRASADAS

5.3.1 Ensaios Preliminares

Os ensaios preliminares tiveram o intuito de fazer a adequação dos parâmetros de brasagem para produção de juntas com melhor qualidade. Melhor qualidade, nesse caso, se refere ao preenchimento completo da região da junta com ausência de trincas e descontinuidades muito grandes. Para esses ensaios, os parâmetros usados são aqueles descritos na Tabela 9. Todas as juntas analisadas por inspeção visual são classificadas como “classe A” de acordo com a norma AWS C3.4M (2015), que caracteriza junta sujeitas a tensões altas e/ou cíclicas e a sua falha pode levar a riscos a propriedades ou pessoas, ou falha operacional significativa. A Figura 23 apresenta as chapas brasadas com 25%, 35% e 45% Ag depois do processo de pós-limpeza.

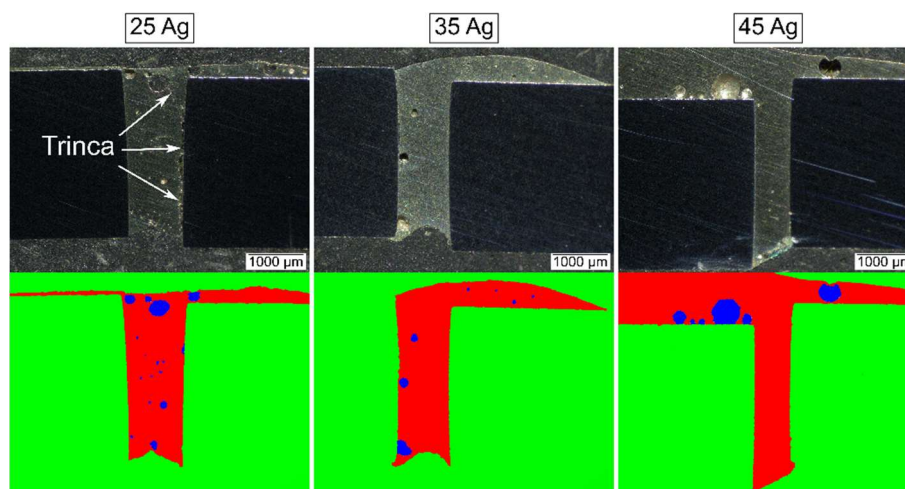
Figura 23 - Juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza (ensaios preliminares): (a) 25% Ag; (b) 35% Ag e (c) 45% Ag



Fonte: O autor (2021).

Na análise visual verifica-se que a junta 35 Ag apresenta pontos com falta de preenchimento bastante acentuada, deixando-a reprovada de acordo com o item 6.6.1.1. da norma AWS C3.4M (2015). Descontinuidades externa com tamanho maior que 2,3 mm não são aceitáveis segundo a referida norma. Em contrapartida, as juntas 25 Ag e 45 Ag apresentaram um preenchimento aparentemente adequado, sendo que a junta 25 Ag apresenta um excesso de metal de adição que se deve a sua dificuldade de espalhamento. Além da avaliação externa, foram verificadas as seções transversais das juntas brasadas. Com isso, foi analisada a seção transversal da união entre o metal de base e o metal de adição. A Figura 24 apresenta as macrografias da seção transversal das amostras brasadas indicando a formação de poros para cada condição de metal de adição.

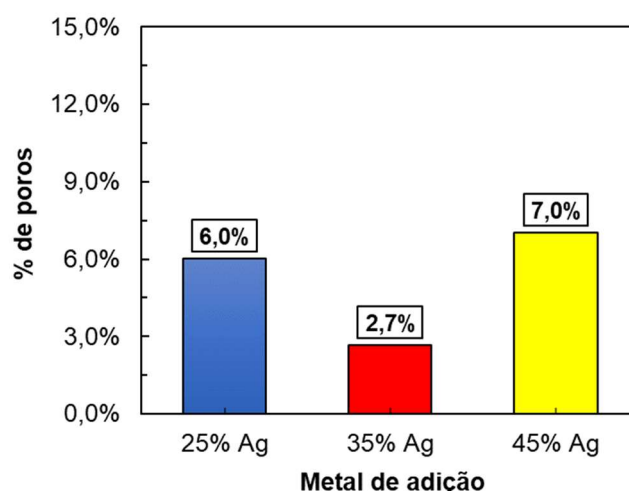
Figura 24 - Macrografias da seção transversal das juntas brasadas (ensaios preliminares)



Fonte: O autor (2021).

Analisando as macrografias de forma semiquantitativa, nota-se que internamente a junta 25 Ag apresenta 6,04% de poros e uma grande trinca formada na interface do metal de adição com o metal de base. Em outro ponto, as juntas 35 e 45 Ag apresentam preenchimento quase completo e uma grande quantidade de reforço. Em relação a quantidade de poros, a junta 45 Ag apresenta 7,0% de poros e a junta 35 Ag apresenta 2,7% de poros. Esses poros podem estar relacionados também com a evaporação do zinco no interior do metal de adição durante o processo de brasagem. O zinco apresenta temperatura de vaporização de 907°C , associando isso com a dificuldade de controle de temperatura usando a chama manual, essa vaporização pode ser possível. Tashi *et al.* (2014) reportaram a formação de várias cavidades na região do metal de adição devido à vaporização de zinco. A Figura 25 apresenta o comparativo da porcentagem de poros para cada uma das condições de metal de adição.

Figura 25 - Comparativo da porcentagem de poros para cada condição de metal de adição utilizada (ensaios preliminares)



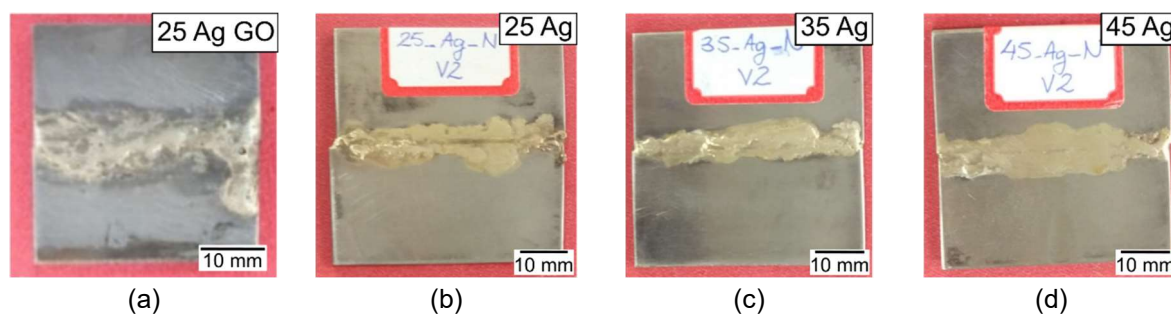
Fonte: O autor (2021).

Nestas condições, temos que a junta 25 Ag seria reprovada por apresentar trincas, estas que são inadmissíveis em qualquer quantidade ou extensão na junta brasada de acordo com o item 6.6.1.4. da norma AWS C3.4M (2015). O mesmo acontece com junta brasada 35 Ag, que apresentou falta de preenchimento excessiva na análise externa da junta. Em outro ponto, a junta brasada 45 Ag, mesmo apresentando 7,04% de área de poros estaria aprovada, visto que essa porcentagem não ultrapassa o valor máximo estabelecido no item 6.6.2.1. da norma AWS C3.4M (2015), que é de 15%. O baixo desempenho das juntas 25 e 35 Ag deve estar relacionado com a soma de uma baixa molhabilidade dos metais de adição, preparação superficial não eficiente e operação do sistema de brasagem.

5.3.2 Ensaio Finais

A partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares, os ensaios finais foram conduzidos de forma a melhorar a produção das juntas brasadas. Para esses ensaios foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 9. Para verificar a condição da rugosidade superficial na molhabilidade foi adotada uma preparação superficial até a lixa de SiC de granulometria 1000 *meshes*. A Figura 26 apresenta as juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza.

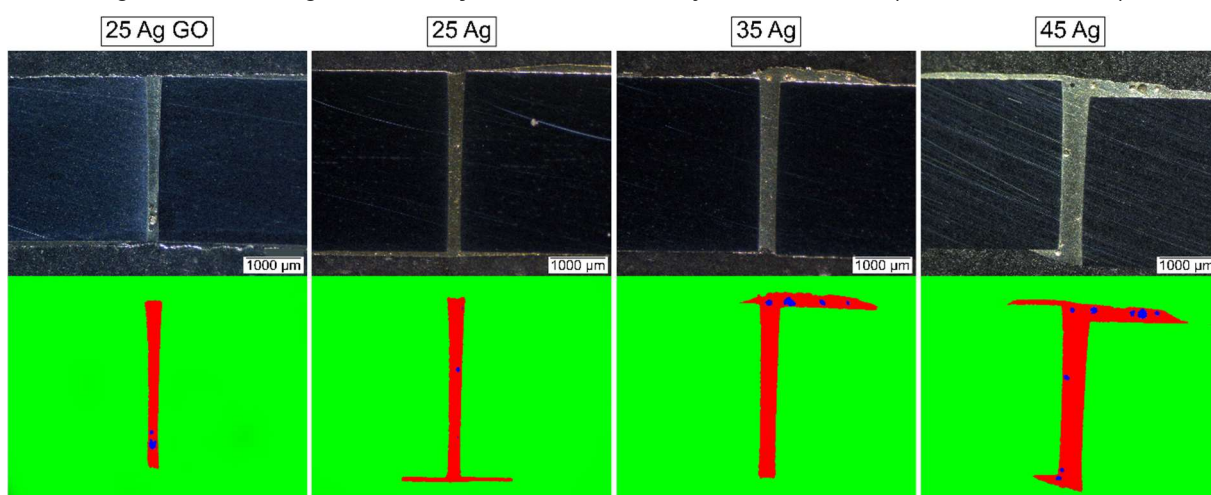
Figura 26 - Juntas brasadas depois do processo de pós-limpeza (ensaios definitivos): (a) 25% com GO; (b) 25% Ag; (c) 35% Ag e (d) 45% Ag



Fonte: O autor (2021).

Analizando novamente o topo das juntas brasadas verifica-se que todas elas apresentam um preenchimento adequado, sem indícios macroscópicos de falta de fusão e/ou descontinuidades visíveis. A junta 25% Ag GO apresentou maior dificuldade deposição, o que pode ser constatada pela quantidade de metal de adição no topo da junta em relação as outras juntas brasadas, Figura 26. Novamente, para assegurar a qualidade da junta, realizou-se a análise da seção transversal da junta brasada para obter dados semiquantitativos referente a porosidade, onde foram analisadas 3 seções transversais diferentes das duas juntas brasadas produzidas para cada condição. A Figura 27 apresenta as macrografias retiradas de uma das seções transversais das amostras brasadas junto com a identificação dos poros.

Figura 27 - Macrografias da seção transversal das juntas brasadas (ensaios definitivos).

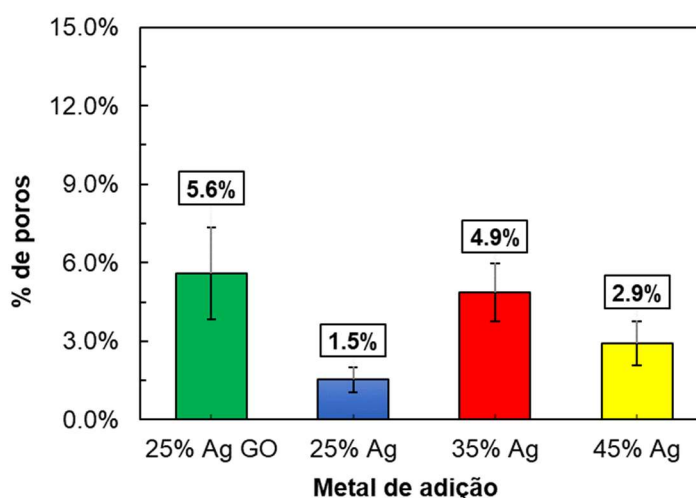


Fonte: O autor (2021).

A partir das macrografias observa-se que todas as juntas tiveram preenchimento quase completo com uma baixa porcentagem de poros, com exceção

da junta 35 Ag. A brasagem com o metal de adição 25% Ag contendo GO foi realizada com sucesso. Apesar de apresentar vários poros espalhados pela seção transversal, o que deve estar relacionado com a baixa molhabilidade do metal de adição somado com o efeito que o grafeno tem de reduzir a molhabilidade em metais de adição à base de prata (LIU *et al.*, 2018). Na ocasião, o grafeno dificultou a difusão de elementos (TiC) que favoreciam a molhabilidade do metal de adição para interface com o metal de base. Ademais, apresentou uma porcentagem de poros de 6,3%, o que é relativamente alta, mas ainda sim aceitável de acordo com a AWS C3.4M (2015). A junta 35 Ag apresenta uma maior quantidade de poros em relação aos ensaios preliminares, 4,9%. Já as juntas 25 e 45 Ag apresenta menor porcentagem de poros, 1,5% e 2,9%, respectivamente. A Figura 28 apresenta o comparativo da porcentagem de poros para cada uma das condições de metal de adição.

Figura 28 - Comparativo da porcentagem de poros para cada condição de metal de adição utilizada (ensaios definitivos).



Fonte: O autor (2021).

De forma geral, na inspeção visual, pode-se avaliar que as juntas brasadas nessa condição tiveram desempenho superior as juntas obtidas nos ensaios preliminares, tanto na análise externa quanto na análise interna. Todas as juntas foram aprovadas baseado nos requerimentos da norma AWS C3.4M (2015). As juntas 25 Ag GO e 35 Ag apresentaram maior porcentagem de poros, mas em quantidades que não as desqualificam. A maior quantidade de poros na condição 35 Ag deve estar relacionada as condições de preparação superficial, que devido a característica

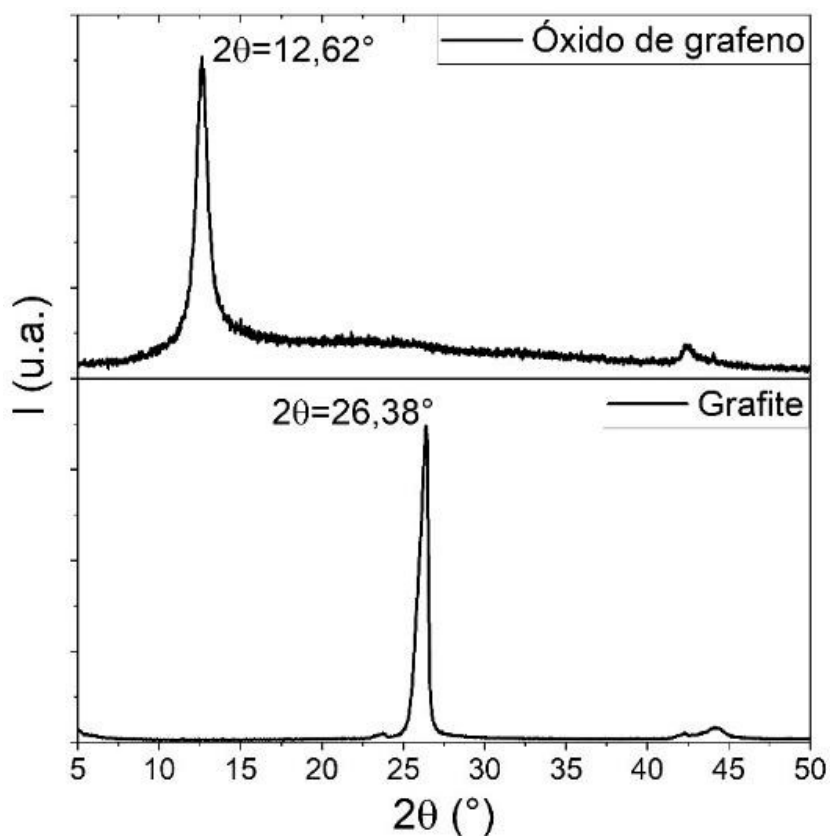
manual do processo não preparadas de maneira satisfatória. O mesmo fator pode ter influenciado também na alta porosidade da junta 25 Ag GO. A menor porcentagem de poros observadas nos ensaios finais em relação aos ensaios iniciais deve estar relacionada com a melhora da molhabilidade promovida pelo melhoramento da condição superficial. Jacobson e Humpston (2005) afirmam que uma menor rugosidade tende a melhorar o espalhamento do metal de adição, visto que uma rede de canais finos é produzida, a texturização provoca um aumento a força de capilaridade agindo entre o metal de adição e metal de base. Zaharinie *et al.* (2015) conseguiram produzir uma junta brasada com menos vazios melhorando a preparação superficial do metal de base que é uma liga de cobre usando uma liga Cu-Sn-P como metal de adição. Por fim, conclui-se que foi possível unir por brasagem o aço inoxidável 304 usando um metal de adição à base de prata contendo GO e foi possível também conseguir espaçamentos de aproximadamente 0,5 mm.

5.4 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS JUNTAS BRASADAS

5.4.1 Difração de Raios-X

O ensaio de difração de raios-X foi usado para verificar as fases presentes nas juntas 25 Ag e 25 Ag GO visando, primariamente, a identificação óxido de grafeno nesta última. Além disso, foram analisadas as juntas 35 Ag e 45 Ag. A Figura 29 apresenta os difratogramas de raios-X do pó de grafite, produto obtido na síntese. Segundo Marques (2021) o principal pico em difratogramas tanto do grafite quanto de materiais como GO e GOr é o pico referente ao basal (plano 001), referente ao plano no qual ocorrem as ligações covalentes.

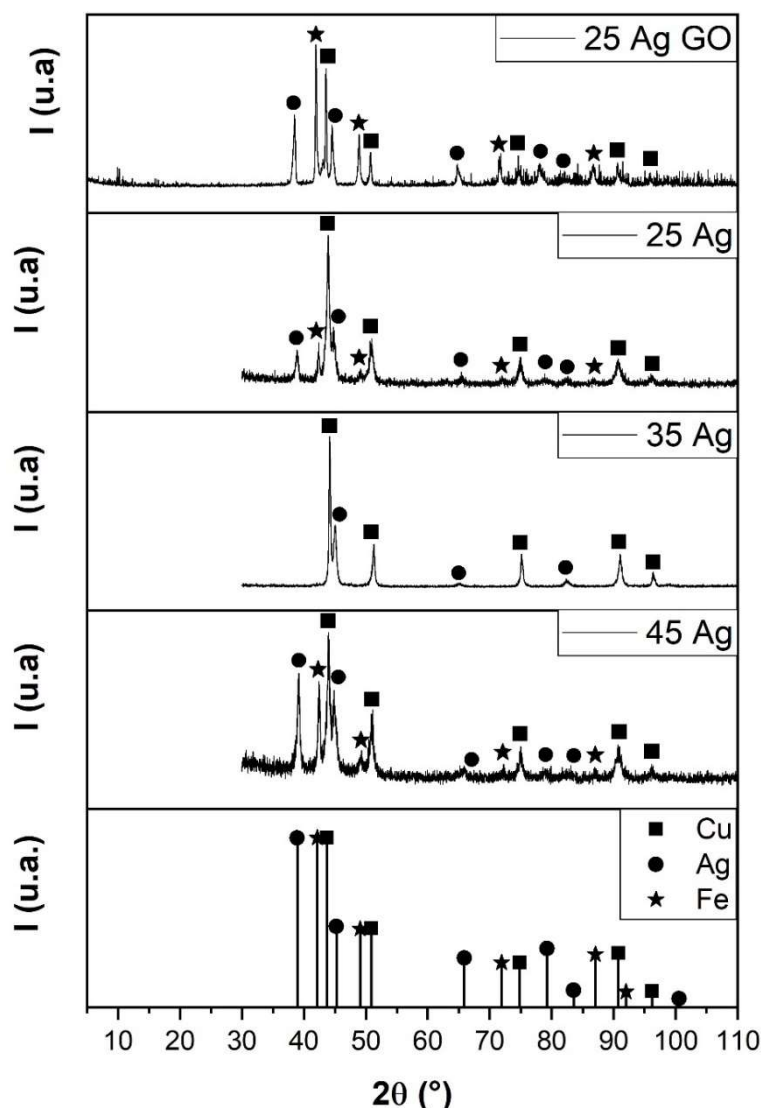
Figura 29 - Difratomogramas de raios-X do grafite e do óxido de grafeno



Fonte: Marques (2021).

Como observa-se na Figura 29, o pico do óxido de grafeno corresponde a $12,62^\circ$ e o pico do grafite corresponde a $26,38^\circ$. Por ser um material amorfo e não apresentar cartas de difratogramas em bancos de dados, o resultado apresentado acima será usado como referência para identificação do óxido de grafeno na junta brasada 25 Ag GO. A Figura 30 apresenta os espectros de DRX obtidos para todas as juntas brasadas.

Figura 30 - Espectros de DRX obtidos das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag



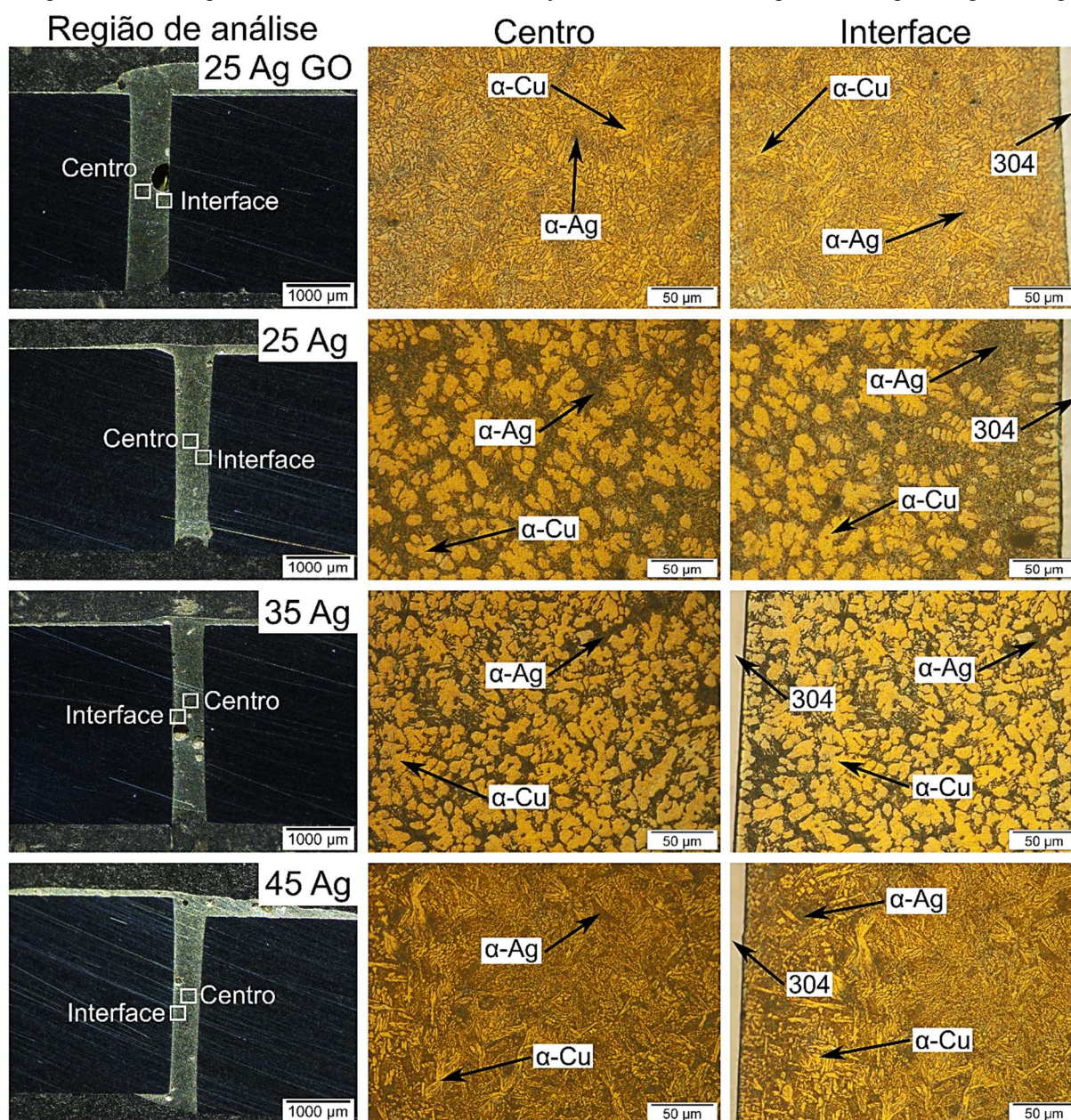
Fonte: O autor (2021).

Os resultados de DRX apresentados na Figura 30 confirmam a presença das fases identificadas nas análises de MEV dos metais de adição, solução sólida de Ag (α -Ag) e solução sólida de Cu (α -Cu), além da austenita (γ -Fe) detectado a partir do aço inoxidável austenítico, o que está em acordo com o resultado obtido por Gangadharan *et al.* (2016). Não foi verificado a presença de compostos intermetálicos como γ -Cu₅Zn₈, AgZn₃ e β -CuZn, em acordo com o que foi obtidos por Sui *et al.* (2013) e Wang *et al.* (2018). Quando se trabalha com ligas com teor de prata abaixo de 50%, as fases dúcteis reduzem levando ao aumento da formação de fases frágeis como o γ -Cu₅Zn₈, o que pode afetar as propriedades mecânicas do material (WANG e XUE, 2016). Por fim, foi possível identificar um pico em $10,22^\circ$ na junta brasada 25 Ag GO que pode estar relacionado com o óxido de grafeno.

5.4.2 Microscopia Óptica

Foram realizadas análises microestruturais por MO em amostras das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag. A Figura 31 apresenta as micrografias com as microestruturas obtidas a partir da região central e interface metal de base/metal de adição das juntas brasadas.

Figura 31 - Micrografias do centro e interface das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag

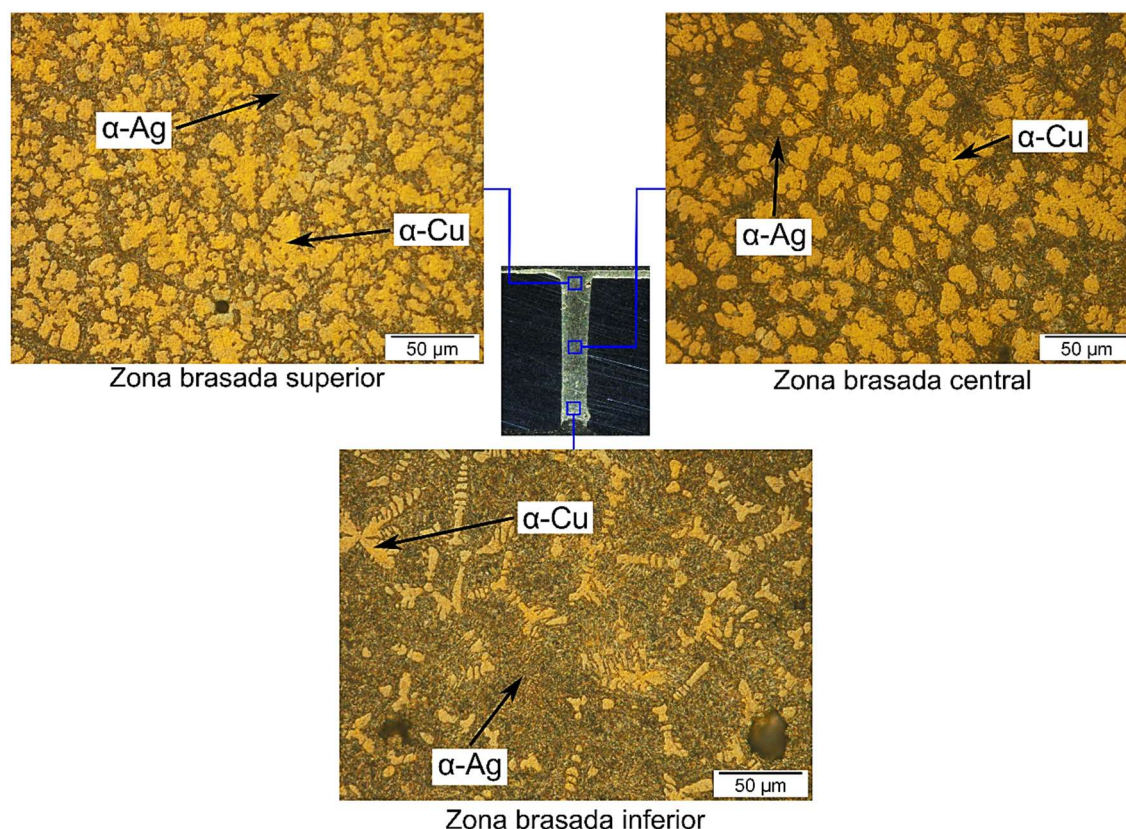


Fonte: O autor (2021).

A partir das micrografias da Figura 31 observa-se, em todas as juntas brasadas, a formação dos microconstituintes ricos em cobre e em prata já apresentados na Figura 16. Sendo que, a partir dos resultados de DRX da Figura 30, essas fases podem ser especificadas como α -Cu e α -Ag com estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Micrografias obtidas por MO com morfologias semelhantes foram observadas por Siqueira *et al.* (2021), onde o microconstituente claro se tratava de uma solução sólida rica em cobre e o microconstituente escuro uma solução sólida rica em prata. Nas juntas obtidas com todos os metais de adição, o microconstituente rico em cobre apresenta núcleos envoltos de uma matriz do microconstituente rico em prata. O que faz sentido pois o cobre tem ponto de fusão superior ao da prata e, portanto, vai solidificar primeiro formando núcleos enquanto a prata ainda vai estar no estado líquido.

A microestrutura das juntas 25 Ag e 35 Ag mostram morfologias bastante semelhantes, com uma estrutura do microconstituente rico em cobre que se assemelha a dendritas, apresentando uma separação mais evidente entre o microconstituente rico em prata e o rico em cobre. Além disso, observando o desenvolvimento microestrutural na interface das duas condições, nota-se uma região com aspecto colunar na junta 25 Ag e um aspecto coquilhado na junta 35 Ag, Figura 31, o que indica uma baixa taxa de resfriamento e uma elevada taxa de resfriamento, respectivamente. Em contrapartida, as condições 25 Ag GO e 45 Ag apresentam morfologias bem diferentes em relação àquelas. A junta 25 Ag GO apresenta uma microestrutura bastante refinada com o microconstituente rico em cobre apresentando núcleos menores circundado pelo microconstituente rico em prata. A junta 45 Ag apresenta microestrutura com o microconstituente rico em cobre formando núcleos com forma semelhante a agulhas com diversos núcleos menores dispersos no microconstituente rico em prata. Além disso, foi verificado uma heterogeneidade microestrutural para as condições 25 Ag e 35 Ag nas regiões superior, central e inferior da junta brasada. A Figura 32 apresenta a variação da fração volumétrica de ambos os microconstituintes na junta brasada 25 Ag.

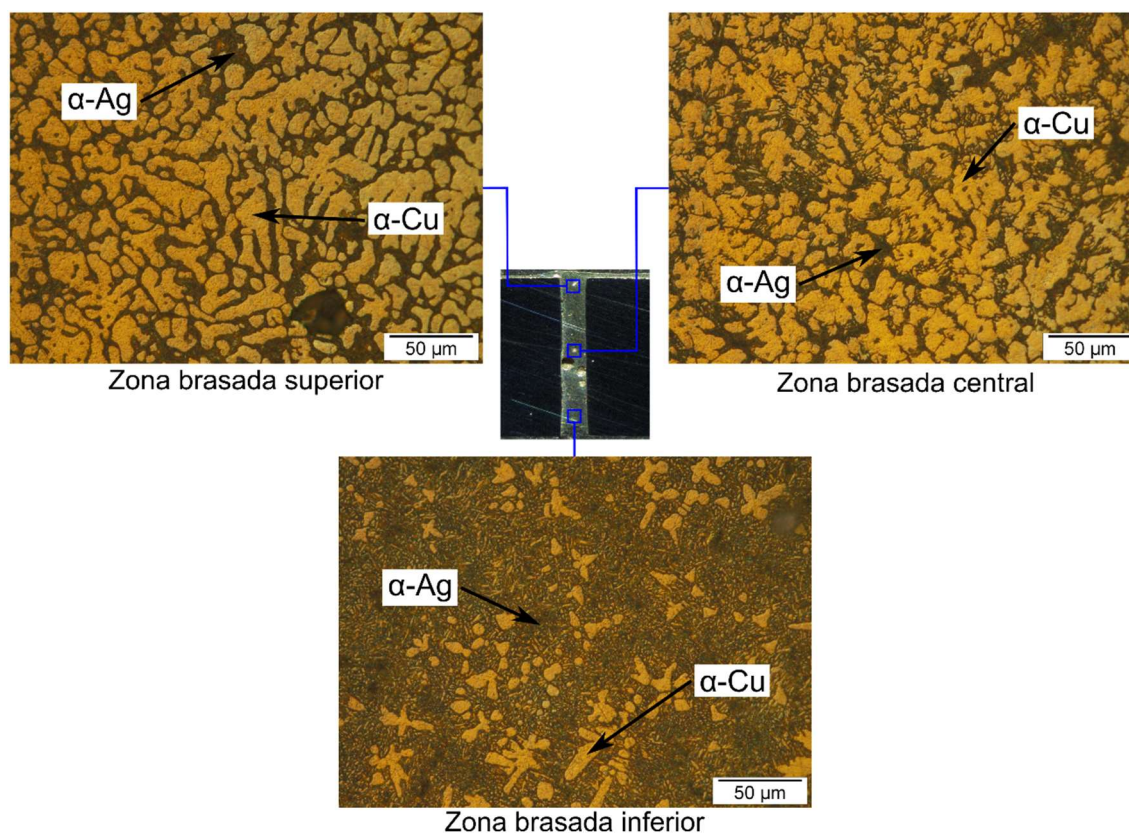
Figura 32 - Micrografias das diferentes regiões (superior, central e inferior) da junta brasada 25 Ag



Fonte: O autor (2021).

Observando a Figura 32 nota-se que na região superior do junta brasada - na qual o processo de solidificação ocorre por último em relação ao resto da extensão da junta - há um teor de prata significativamente menor do que o observado no restante da junta. O microconstituente rico em prata encontra-se presente entre as células do microconstituente rico em cobre ao longo de toda a junta. No entanto, à medida que se aproxima da região inferior da junta brasada observa-se uma maior quantidade de microconstituente eutético, Figura 32. O mesmo comportamento acontece com na junta brasada 35 Ag. A Figura 33 apresenta a variação da quantidade de ambos os microconstituintes na junta brasada 35 Ag.

Figura 33 - Micrografias das diferentes regiões (superior, central e inferior) da junta brasada 35 Ag



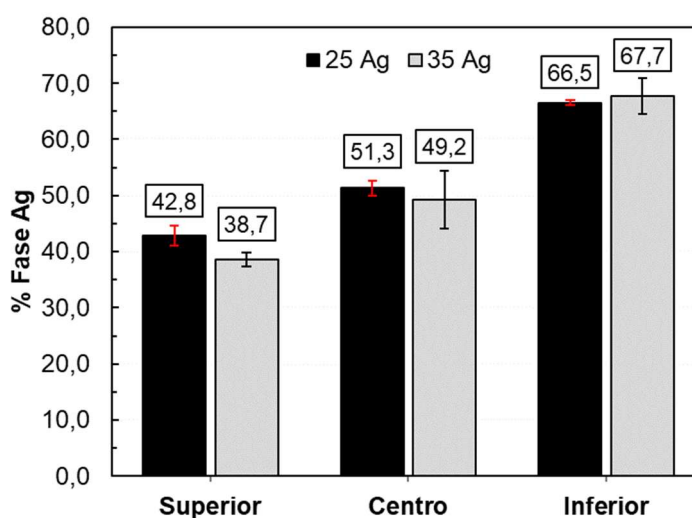
Fonte: O autor (2021).

Um comportamento de heterogeneidade microestrutural semelhante foi observado por Siqueira *et al.* (2021), na ocasião observou-se uma maior quantidade de fase rica em prata a medida em que se aproximava da região inferior da junta brasada. No presente caso, observa-se uma maior predominância de microconstituente eutético. Esse fenômeno deve estar relacionado com uma maior taxa de resfriamento na região inferior da junta brasada, que é a região que solidifica primeiro. Considerado a brasagem com maçarico na configuração plana com alimentação do metal de adição no topo da junta, temos que a região superior da junta é a última em que o processo de solidificação é concluído e é a região com menor exposição à alta temperatura, visto que após o preenchimento completo há uma imediata interrupção do calor adicionado pela tocha. Portanto, esta região da junta tem menor tempo de exposição a altas temperaturas após a solidificação. Por outro lado, a região inferior da junta brasada é exposta a altas temperaturas por mais tempo após a solidificação do metal de adição, devido ao processo de acúmulo térmico, enquanto o resto da junta ainda está recebendo o metal de adição. A partir disso, a maior taxa de resfriamento associada a essa região provoca uma mudança na

temperatura de solidificação da fase rica em cobre. A formação da dessa fase é atrasada e são formados grãos desse microconstituente primário de forma zonada como observado na Figura 32 e Figura 33, com o microconstituente eutético formando em maior quantidade para situação de equilíbrio.

A partir disso, foi realizada uma análise quantitativa nas imagens de MO obtidas das regiões superior, central e inferior das juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag. Foram utilizadas 3 (três) imagens de cada região para obter um valor médio da fração de fase prata em cada condição. A Figura 34 apresenta um gráfico de barras indicando a porcentagem da fase prata nas diferentes regiões das juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag.

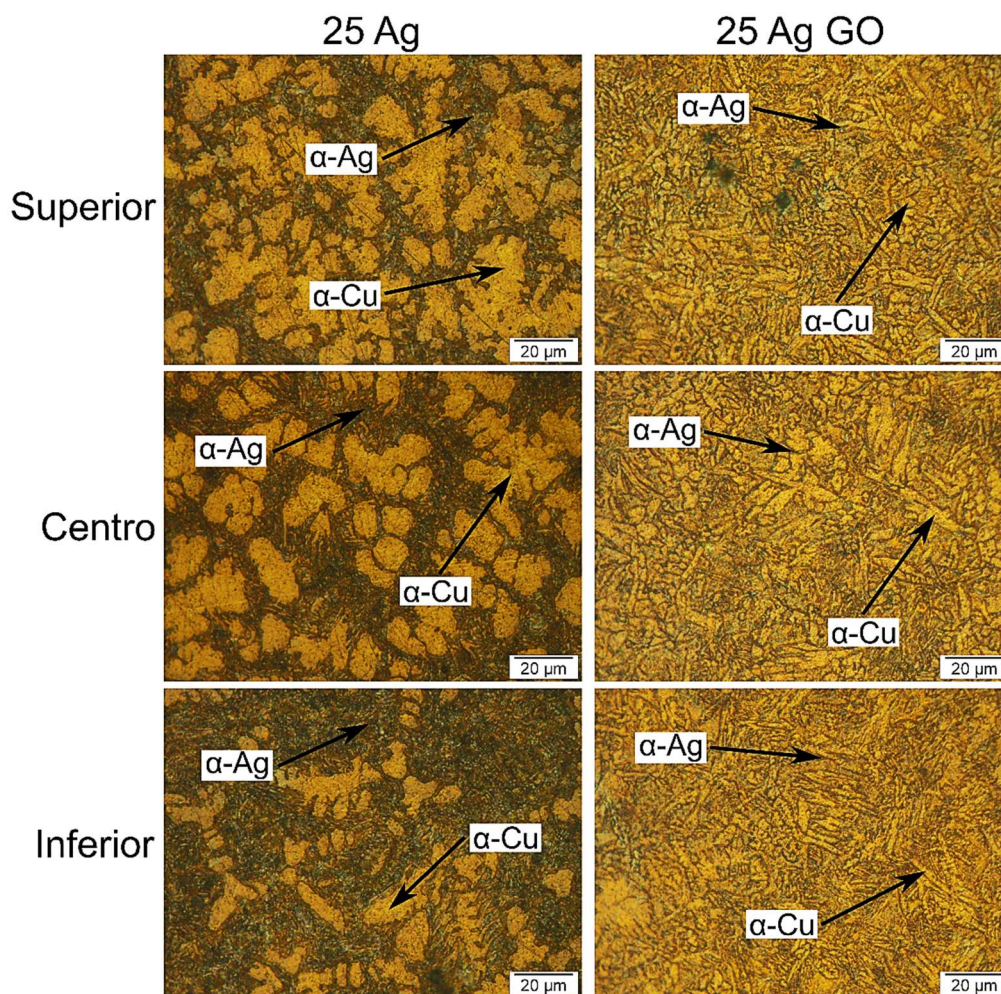
Figura 34 - Porcentagem de variação da fase prata na região superior, central e inferior das juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag



Fonte: O autor (2021).

A partir do gráfico da Figura 34 observamos claramente a tendência de crescimento da porcentagem de fase prata para ambas as condições, onde esse aumento da relação entre a região superior e inferior chega a 55,4% na junta 25 Ag e 74,9% na junta 35 Ag. Observa-se ainda que a porcentagem de fração de fase nas regiões em cada uma das amostras apresenta valor próximo. Nesse ponto, observou-se que a adição de GO no metal de adição 25 Ag permitiu contornar esse problema. A Figura 35 apresenta a comparação das microestruturas obtidas ao longo de toda a junta as condições 25 Ag e 25 Ag GO.

Figura 35 – Micrografias apresentando a comparação microestrutural entre as juntas com 25% Ag e 25% Ag GO na região superior, central e inferior



Fonte: O autor (2021).

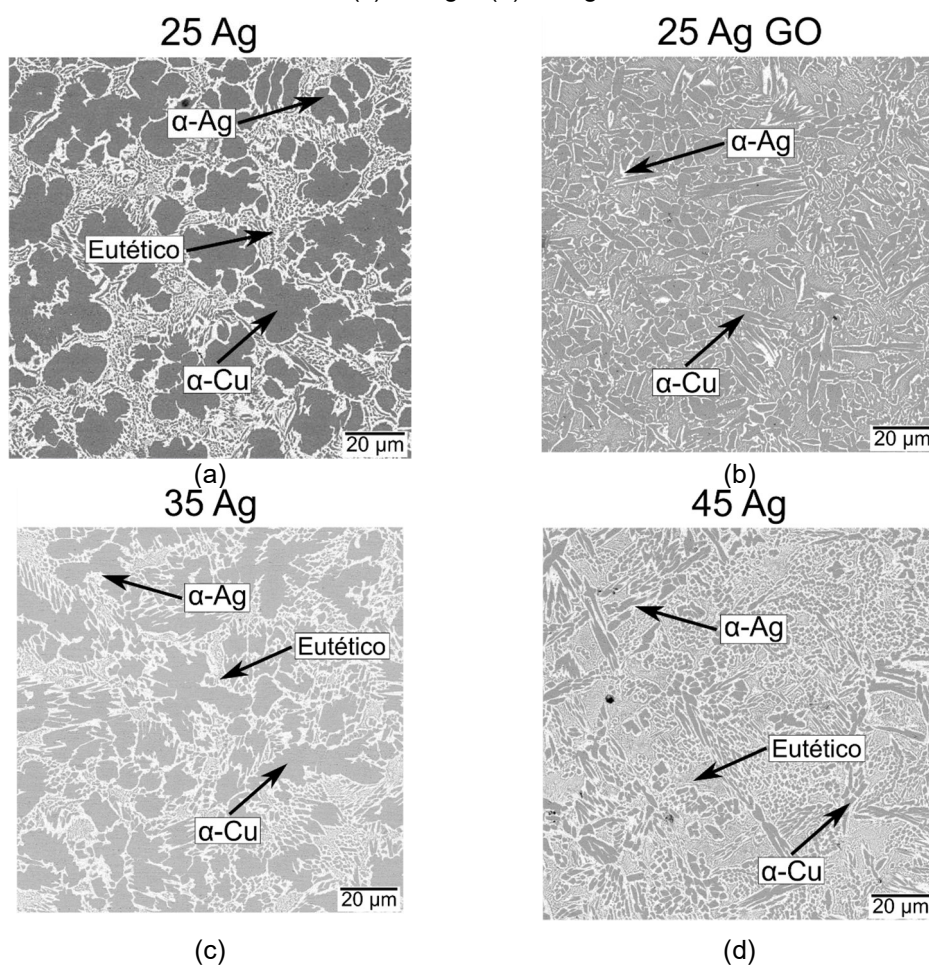
Na junta 25 Ag GO foi observado uma homogeneidade microestrutural ao longo de toda a junta. Além disso, observando a Figura 35, nota-se que a adição de GO favoreceu o refinamento da microestrutura. Mudanças microestruturais foram reportadas em outros estudos com adição de grafeno no metal de adição. Lee *et al.* (2020) observaram que a adição de grafeno no consumível à base de níquel melhorou os aspectos difusionais dos compostos intermetálicos para regiões da interface da junta brasada. No presente caso, a hipótese para a mudança microestrutural é que o GO se apresenta como um agente nucleante em toda a extensão da junta brasada. A partir disso, tem-se a formação de vários núcleos pequenos levando a um crescimento competitivo, o que contribui para a formação de uma microestrutura mais refinada e homogênea. A expectativa é que análises de MEV também possam confirmar a presença de óxido de grafeno na junta brasada assim como na análise de difração de

raios-X. Com isso, preliminarmente, pode-se afirmar que a adição de GO melhorou as características microestruturais do metal de adição com 25% Ag.

5.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Buscando aprofundar as investigações das microestruturas desenvolvidas por cada condição de metal de adição durante o processo de brasagem, foram realizadas análises de microscopia eletrônica varredura usando sinais de Elétrons Retroespalhados (BSE) em amostras com a superfície polida. A Figura 36 apresenta as fases presentes nas juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag.

Figura 36 - Micrografias obtidas por MEV usando BSE das juntas brasadas: (a) 25 Ag; (b) 25 Ag GO; (c) 35 Ag e (d) 45 Ag

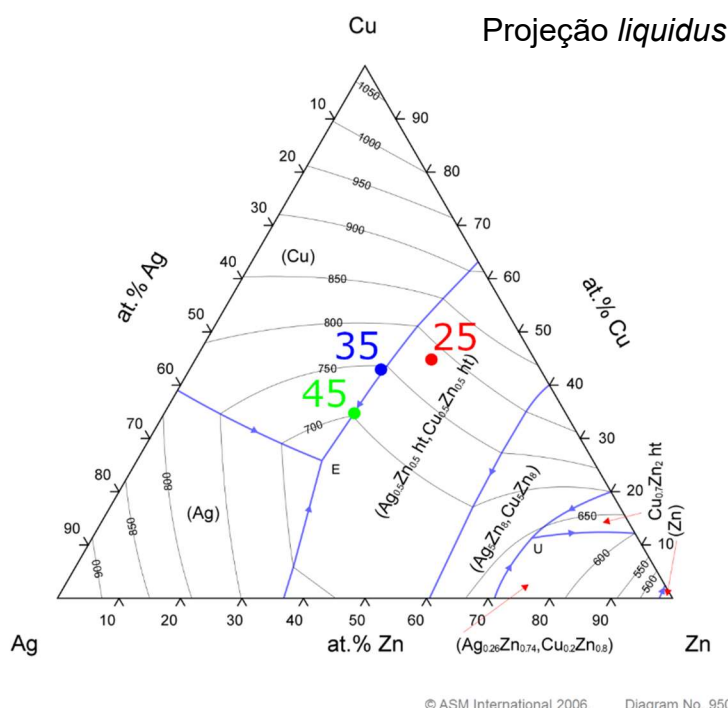


Fonte: O autor (2021).

As micrografias da Figura 36 apresentam fases com uma morfologia bem semelhante as microestruturas obtidas na análise de MO. Isso demonstra que a análise

de MO já apresentava a morfologia das fases existentes na junta brasada. Além disso, a partir do contraste de cores e do peso atômico dos elementos compostos na liga dos metais de adição, temos o indicativo de que o microconstituente escuro visto no MO é de fato uma fase rica em prata, e o microconstituente claro é uma fase rica em cobre, para todas as ligas estudadas, indo ao encontro do que já foi observado nas análises de MEV-BSE dos metais de adição como recebido na seção 5.1.1. Além das fases cobre e prata que já foram constatadas, é observado também a presença de um microconstituente eutético (Cu + Ag), semelhante ao observado por Siqueira *et al.* (2021). Uma maneira de verificar as fases presentes em cada junta brasada seria a partir da observação do diagrama ternário da liga Ag-Cu-Zn (ASM INTERNATIONAL, 1990). A Figura 37 apresenta a projeção *liquidus* do diagrama ternário Ag-Cu-Zn com os pontos marcados das ligas com 25%, 35% e 45% Ag.

Figura 37 - Projeção *liquidus* do diagrama ternário Ag-Cu-Zn com os pontos dos metais de adição com 25%, 35% e 45% Ag



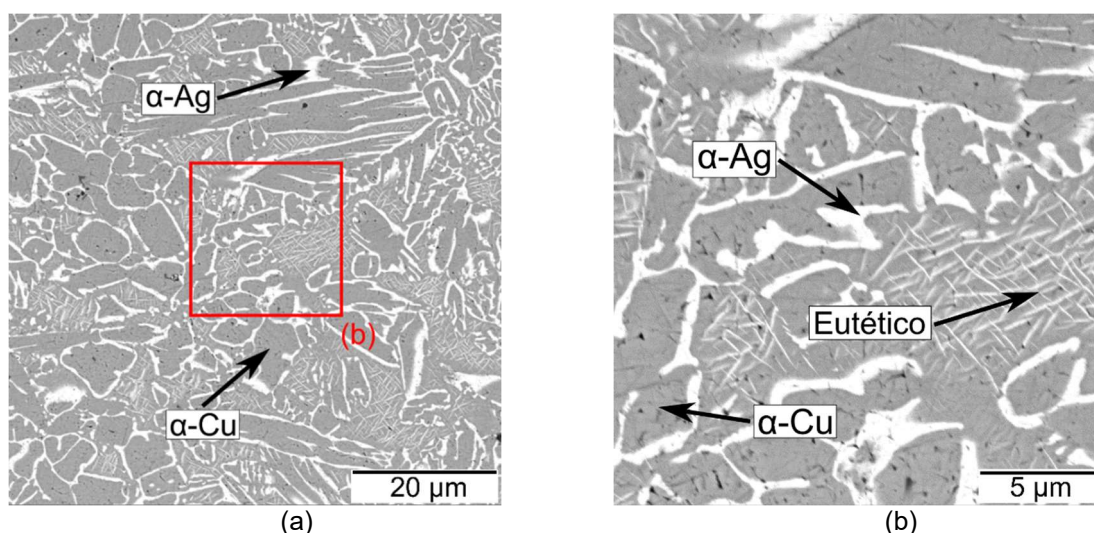
Fonte: ASM INTERNATIONAL (1990).

Observando o diagrama acima nota-se que as ligas de 35 e 45 Ag estão sobre a calha que separa a solidificação primária da fase (Cu) e fase β , e a liga 25 Ag apresenta-se inteiramente no campo da fase β . Na situação de equilíbrio espera-se que a liga 25 Ag solidifique primariamente em β , no entanto, como trata-se de um

processo fora do equilíbrio ocorrem mudanças na solidificação das fases. Além disso, foi observado durante o processo de brasagem uma chama com coloração esverdeada, o que indica a evaporação de zinco. Essa evaporação de zinco é uma suposição razoável baseado na temperatura do processo e foi reportada também no trabalho de Tashi *et al.* (2014). Essa observação é importante, pois a redução do teor de zinco provoca um deslocamento dos pontos do diagrama da Figura 37 para o campo de solidificação primária da fase (Cu). Isto é reforçado pela presença da fase β não ser verificada tanto no DRX quanto nas análises de MEV-BSE. A partir disso, a hipótese é que todas as juntas brasadas tenha solidificado primariamente com a fase (Cu).

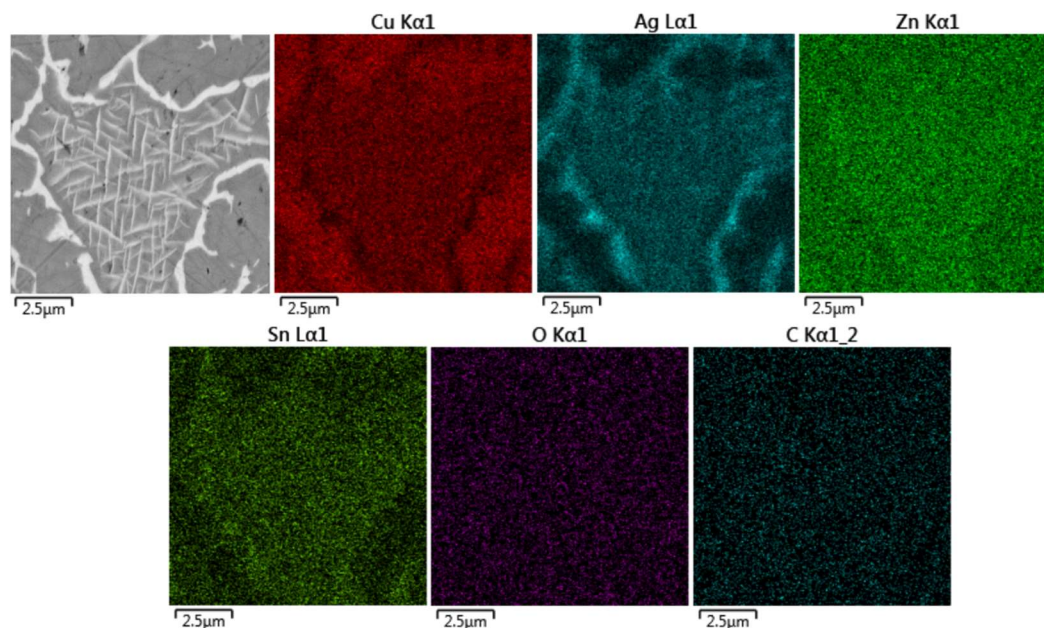
A partir da junta brasada 25 Ag GO na Figura 36, nota-se várias regiões de fases de agulhas. Visando obter mais detalhes da distribuição e identificar essas fases de agulha nessa condição de junta, foram realizadas análises de BSE com maiores magnificações e também uma análise por EDS de mapa. A Figura 38 apresenta micrografias obtidas das juntas 25 Ag GO e 45 Ag com magnificações de 3.000x e 10.000x, respectivamente. A Figura 39 apresenta a distribuição dos elementos nas fases de agulha da junta 25 Ag GO.

Figura 38 - Micrografias obtidas por MEV da junta brasada 25 Ag GO: (a) Vista geral e (b) Detalhe magnificado da figura (a)



Fonte: O autor (2021).

Figura 39 - Mapas elementais obtidos por EDS da região com fase de agulhas da junta brasada 25 Ag GO



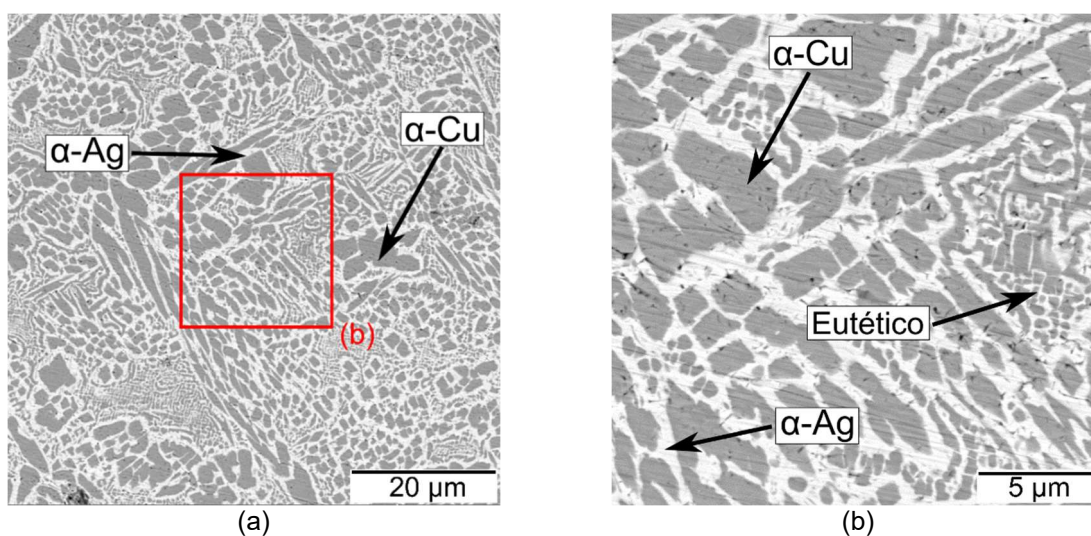
Fonte: O autor (2021).

A partir das micrografias da Figura 38 é possível observar melhor as estruturas presentes no campo de fases de agulhas da Figura 36 para a condição 25 Ag GO, onde nota-se a fase (Cu) que foi formada a partir do líquido, a fase (Ag) que se formou posteriormente no contorno das células de (Cu) por transformação de estado sólido e uma estrutura de agulhas compostas por uma fase rica em Ag. A formação de fases como agulha foram observadas por Cao *et al.* (2011), onde por meio de análise de EDS e a partir do diagrama ternário Ag-Cu-Zn a fase foi identificada como sendo um microconstituente eutético formado por solução sólida de Ag e solução sólida de Cu. Os autores confirmaram que o mecanismo de formação dessas fases deve estar relacionado a uma elevada velocidade de resfriamento. Além disso, uma grande quantidade dessas fases como agulha podem prejudicar o desempenho mecânico da junta brasada (CAO *et al.*, 2011; MA, XUE e WANG, 2016). A partir dos mapas elementais da Figura 39, observa-se a presença de prata, cobre e zinco na região das agulhas, corroborando que esta seja de fato um microconstituente eutético. Além disso, verifica-se que o zinco está presente quase de forma homogêneo junto com o cobre e prata, fato esse que se deve a sua boa solubilidade tanto na prata quanto no cobre tomando como referência os diagramas binários Cu-Zn e Ag-Zn (ASM INTERNATIONAL, 1990). Outro ponto importante de ressaltar sobre a junta brasada

25 Ag GO é que não foi possível verificar a presença de óxido de grafeno através das análises de MEV, provavelmente devido as magnificações usadas não serem suficientes para visualizar as estruturas de GO.

Em paralelo, também foram obtidas imagens em maiores magnificações para a junta brasada 45 Ag, visando observar melhor as fases presentes. A Figura 40 apresenta micrografias com magnificações de 3.000x e 10.000x. A partir das micrografias observa-se com maiores detalhes do microconstituente eutético observado na Figura 36 para a condição 45 Ag, que apresenta vários núcleos pequenos de fase de solução sólida de cobre em uma matriz de uma fase de solução sólida de prata que deve ter se formado por transformação no estado sólido. É interessante observar também que a distribuição da fase rica em Cu apresenta um formato acicular, o que indica que houve uma alta taxa de resfriamento.

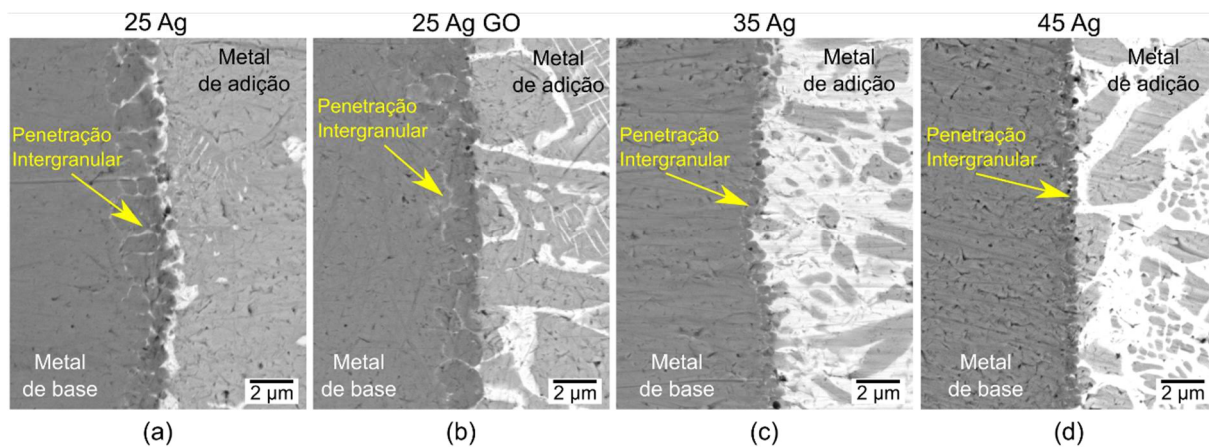
Figura 40 - Micrografias obtidas por MEV da junta brasada 45 Ag: (a) Vista geral e (b) Detalhe magnificado da figura (a)



Fonte: O autor (2021).

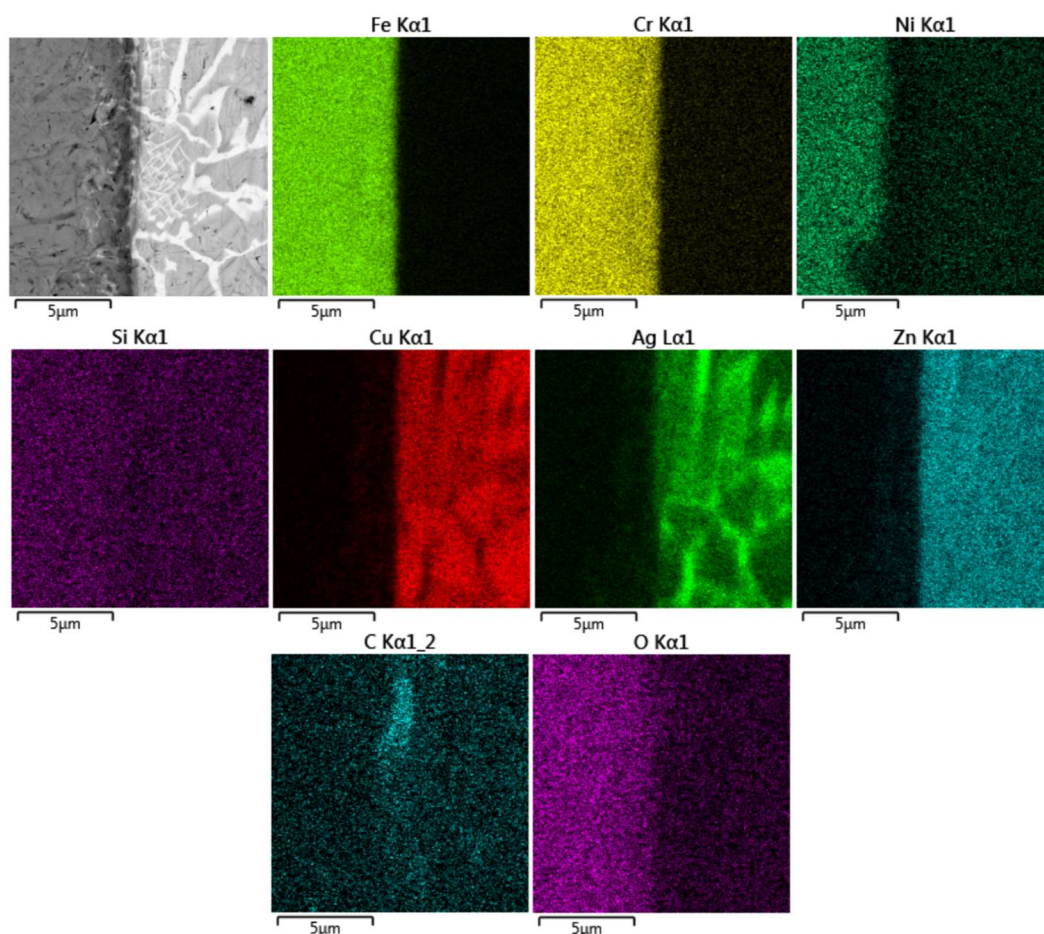
As análises de BSE em maiores magnificações das juntas brasadas, na região da interface entre o metal de base e metal de adição, indicaram também a existência de penetração intergranular de elementos do metal de adição. A Figura 41 apresenta micrografias das juntas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag evidenciando a presença de penetração intergranular na interface metal de base/metal de adição. Buscando ainda avaliar a distribuição dos elementos na região de interface foi realizada ainda uma análise por EDS de mapa da junta brasada 25 Ag GO como mostra a Figura 42.

Figura 41 - Micrografia das juntas brasadas indicando a presença de penetração intergranular de elementos do metal de adição no metal de base: (a) 25 Ag (b) 25 Ag GO; (c) 35 Ag e (d) 45 Ag



Fonte: O autor (2021).

Figura 42 - Mapas elementais obtidos por EDS da interface da junta brasada 25 Ag GO



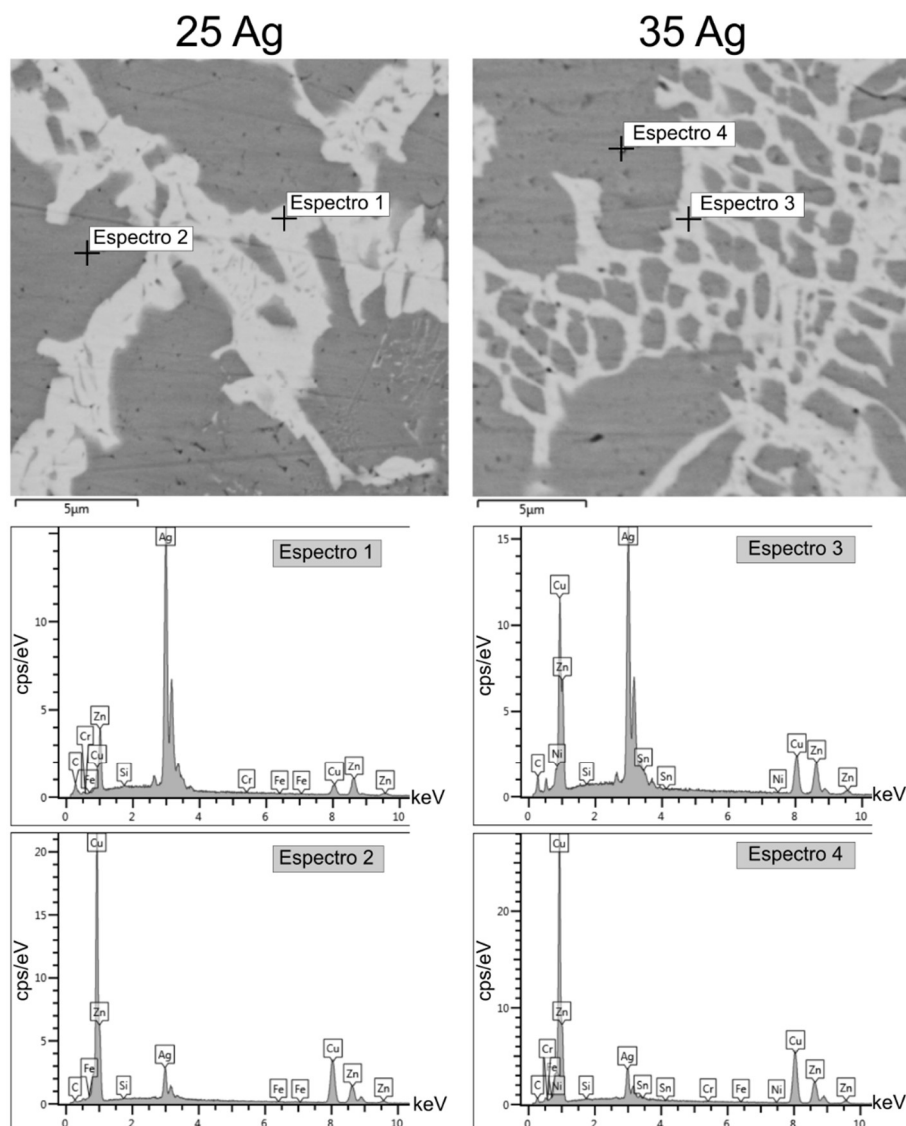
Fonte: O autor (2021).

Na região da interface das juntas brasadas da Figura 41, é possível ver a delimitação dos grãos do metal de base apresentando acúmulo de fase prata ao redor.

Isto evidencia a formação de uma fina camada de reação e também a penetração intergranular de prata no metal de base. A camada de reação geralmente se forma na interface do metal de base/metal de adição e é caracterizada pela intensa difusão entre os elementos de ambos os metais, sendo essa região uma das mais propícias à formação de compostos intermetálicos. Quanto à penetração intergranular, percebe-se que a condição 25 Ag GO e 25 Ag apresentam maior profundidade de penetração de fase prata. Xue *et al.* (2019) observaram penetração intergranular do metal de adição no aço inoxidável 304, representada pelo acúmulo de prata no contorno de grão na região de interface. A maior profundidade dessa penetração para essas condições deve estar relacionada com os indícios de menor taxa de resfriamento que foram verificados na Figura 31, havendo um maior tempo para difusão dos elementos do metal de adição no metal de base. A penetração intergranular é um ponto que merece cuidado, pois sua incidência em um grau excessivo pode prejudicar a plasticidade e resistência das juntas brasadas, resultando em fraturas e falhas de conexão advindas da formação de vazios e fraturas na camada interfacial não plana (INA e KOIZUMI, 2004; LIAN, QU e WANG, 2014; XUE *et al.*, 2019). Nesse ponto, investigações de MEV-BSE não constataram a presença de vazios e trincas ou fraturas na região de penetração intergranular de todas as juntas brasadas. Adicionalmente, os mapas elementais da Figura 42 revelam que ocorre difusão do cobre e zinco para o metal de base na região de interface e não somente a prata. Outros aspectos que são observados é a maior presença de oxigênio no metal de base, devido à sua maior solubilidade, e também a defasagem de níquel que ocorre na camada de interface.

No comparativo entre as juntas com 25 Ag e 35 Ag, que apresentaram morfologias semelhantes e também a heterogeneidade microestrutural. Ambas as condições muito provavelmente apresentam também a mesma sequência de solidificação, que começa com a solidificação da fase (Cu) e posteriormente ocorre a solidificação do líquido remanescente na forma de microconstituente eutético. Foram realizadas análises pontuais de EDS com um espectro coletado na fase rica em prata e outro na fase rica em cobre em ambas as juntas. A Figura 43 apresenta as micrografias indicando os pontos onde foram coletados os espectros de EDS e a Tabela 12 apresenta os resultados quantitativos obtidos na composição química dos espectros de EDS.

Figura 43 - Micrografias indicando os pontos de análise por EDS para as juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag e seus respectivos espectros



Fonte: O autor (2021).

Tabela 12 - Dados quantitativos obtidos na análise química e as possíveis fases para os espectros nas juntas brasadas 25 Ag e 35 Ag

Espectro	Composição (wt%)								Fase presente
	Ag	Cu	Zn	Sn	Cr	C	Fe	Si	
1	75,8	6,8	14,6	0,0	0,1	2,4	0,2	0,1	Solução sólida de Ag (α -Ag)
2	17,2	52,7	25,6	0,0	0,0	4,3	0,0	0,1	Solução sólida de Cu (α -Cu)
3	53,8	18,6	18,4	3,0	0,0	6,0	0,0	0,1	Solução sólida de Ag (α -Ag)
4	14,3	51,3	26,6	0,4	0,1	6,9	0,2	0,1	Solução sólida de Cu (α -Cu)

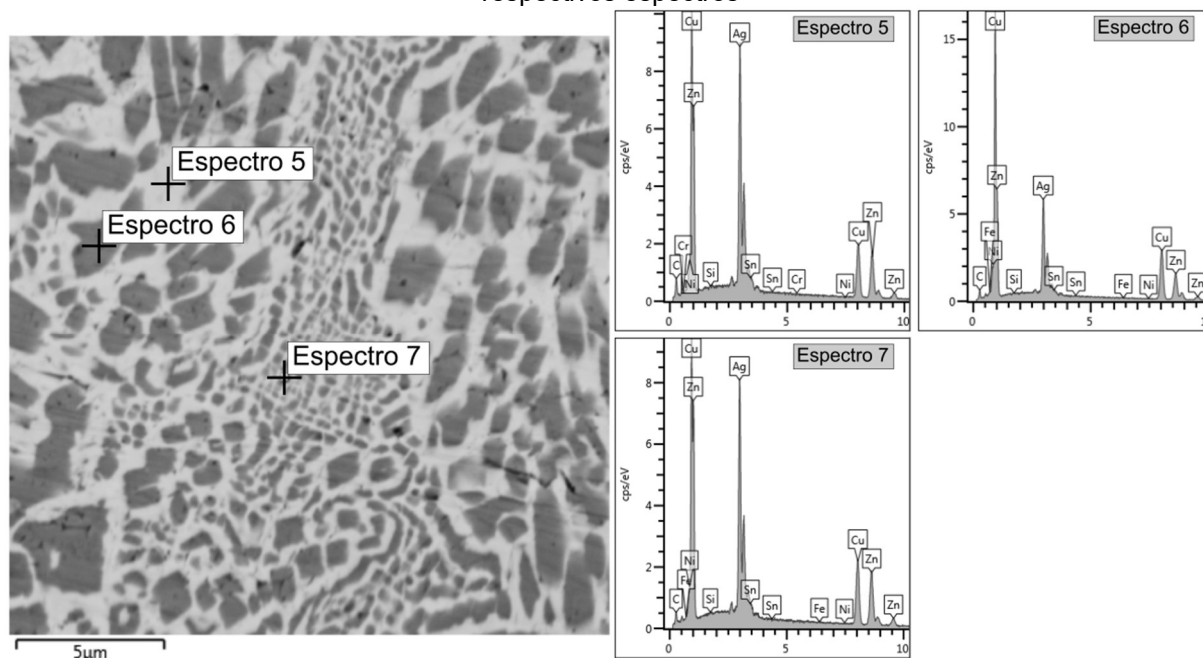
Fonte: O autor (2021).

A análise EDS confirma que as fases observadas são uma solução sólida de Ag e uma solução sólida de Cu (CAO *et al.*, 2011; MA, XUE e WANG, 2016). Na junta 25 Ag, observa-se maiores porcentagens de Cu e Zn na fase rica em cobre, indicando

que este ponto possui uma fase de solução sólida de cobre. Na fase rica em prata, existe uma maior concentração de Ag e Zn, indicando que este ponto apresenta solução sólida rica de prata. Ainda, é importante notar a presença de elementos do metal de base no metal de adição (cromo, ferro e silício) que aparecem em quantidades discretas. Isto indica novamente que ocorreram processos difusionais entre os elementos do metal de base e metal de adição, o que pode levar a formação de fases deletérias. Na junta 35 Ag GO observa-se o mesmo comportamento, com a fase rica em cobre contendo solução sólida de Cu e a fase rica em prata contendo solução sólida de Ag. Além disso, foi detectado a presença de Sn nessa condição, onde o maior teor desse elemento estava presente na solução sólida de prata.

Foram realizadas ainda, análises pontuais de EDS na junta brasada 45 Ag, que a partir da Figura 36 apresenta uma fase rica em cobre, microconstituente eutético e uma fase rica em prata. A Figura 44 apresenta as micrografias indicando os pontos onde foram coletados os espectros de EDS. A Tabela 13 apresenta os resultados quantitativos obtidos na composição química dos espectros de EDS.

Figura 44 - Micrografia indicando os pontos de análise por EDS para a junta brasada 45 Ag e seus respectivos espectros



Fonte: O autor (2021).

Tabela 13 - Dados quantitativos obtidos na análise química e as possíveis fases para os espectros para a junta brasada 45 Ag

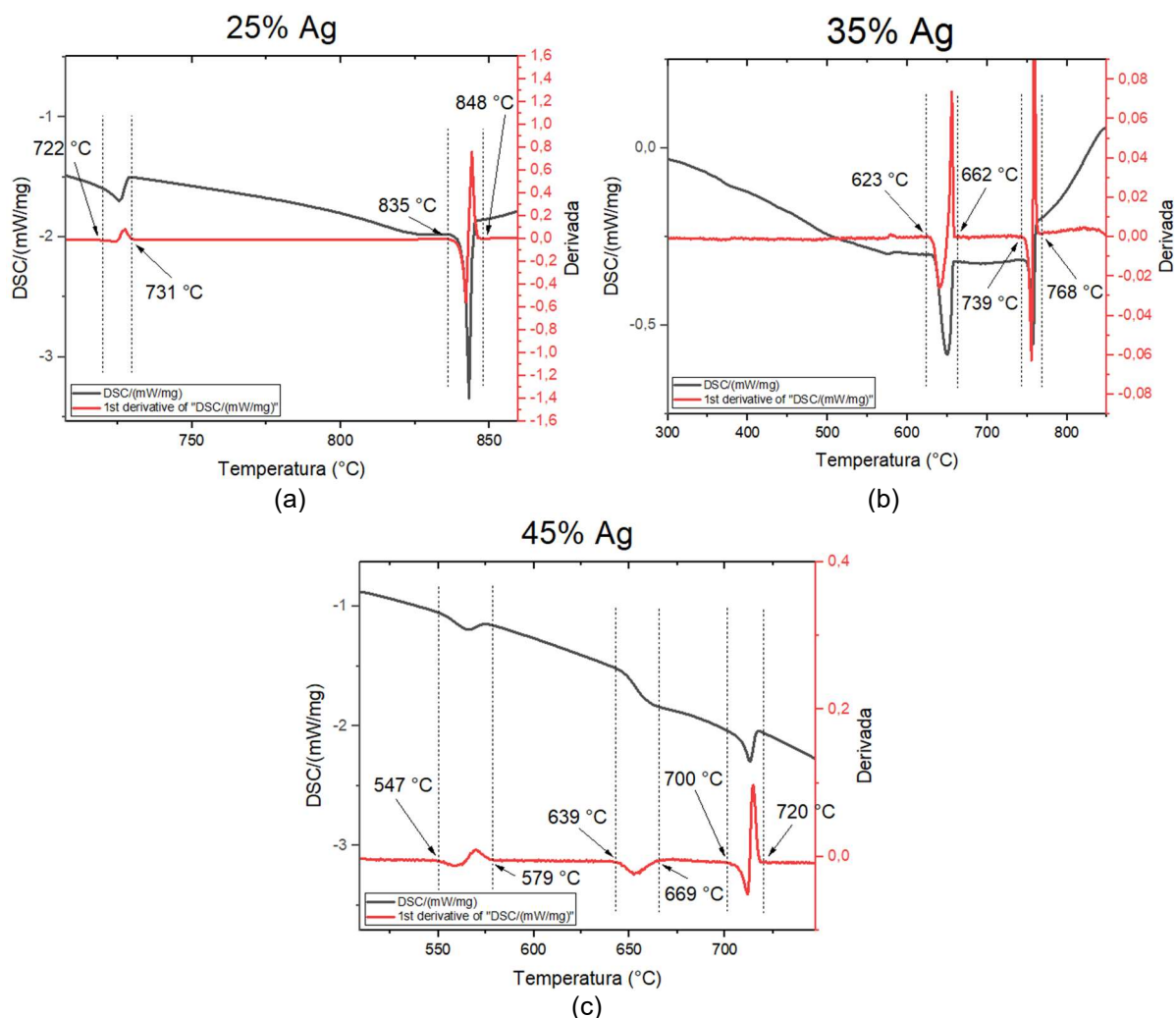
Espectro	Composição (wt%)								Fase presente
	Ag	Cu	Zn	Sn	Ni	C	Fe	Si	
5	45,5	22,8	23,7	1,5	0,0	6,5	0,3	0,0	Solução sólida de Ag (α -Ag)
6	31,9	36,8	23,3	0,8	0,1	6,9	0,1	0,1	Solução sólida de Cu (α -Cu)
7	41,7	25,6	26,4	1,0	0,1	4,4	0,1	0,1	Microconstituente eutético

Fonte: O autor (2021).

Os resultados obtidos nas fases rica em cobre e rica em prata são os mesmos já observados na junta 25 Ag e 35 Ag. A fase rica em cobre apresenta solução sólida de cobre. Já a fase rica em prata, apresenta solução sólida de prata, onde observou-se novamente um maior teor de estanho em relação a fase rica em cobre. A menor quantidade de prata observada no espectro 47 em relação aos espectros 27 e 7 analisados anteriormente, pode estar relacionado com o volume de interação do feixe de elétrons do MEV que pode ter pegado uma fração volumétrica da fase rica em cobre. O mesmo deve ter ocorrido com a varredura do espectro 48 na fase rica em cobre. Em outro ponto, o microconstituente eutético, apresenta uma composição de prata, cobre, zinco e pequenas composições de estanho e elementos do metal de base. A grande quantidade de microconstituente eutético observada nessa condição se deve a composição da liga estar bem próximo do ponto eutético do diagrama Ag-Cu-Zn observado na Figura 37. Nesse ponto, é importante ressaltar que a grande quantidade de microconstituente eutético pode resultar em uma perda de desempenho mecânico por apresentar piores propriedades do que as fases em solução sólida (CAO *et al.*, 2011).

Buscando entender melhor o desenvolvimento microestrutural de cada uma das condições de junta brasada e propor um caminho de solidificação, foram realizados ensaios de calorimetria de varredura diferencial (DSC) para identificar as temperaturas de transformação das fases para comparar com as isotermas disponíveis do diagrama ternário Ag-Cu-Zn (ASM INTERNATIONAL, 1990). A Figura 45 apresenta os resultados do DSC realizados nos metais de adição com 25%, 35% e 45% Ag.

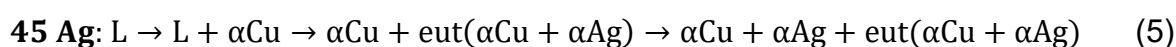
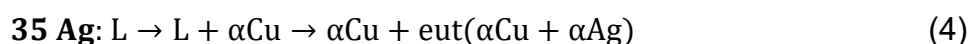
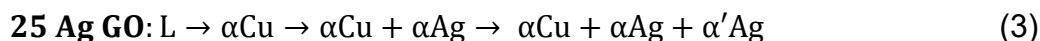
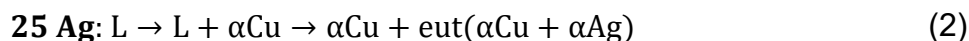
Figura 45 - Curvas de DSC e derivada para cada metal de adição: (a) 25%; (b) 35% e (c) 45% Ag



Fonte: O autor (2021).

A partir da Figura 45 (a), nota-se dois pontos de inflexão indicando a faixa de transformação de fase, a primeira deve estar relacionada com a solidificação da fase (Cu) e a segunda com a solidificação do microconstituente eutético. A Figura 45 (b), apresenta também duas faixas de transformação de fase, como mencionado já suposto anteriormente, a junta 35 Ag apresenta sequência de solidificação semelhante a 25 Ag, começando pela solidificação da fase (Cu) e, em seguida, a solidificação do microconstituente eutético. Já para a Figura 45 (c), observa-se três faixas de transformação de fase, a primeira seria a formação da fase (Cu), seguida pela formação do microconstituente eutético a partir do líquido remanescente e logo após a liga estar solidificada ocorreria a transformação em estado sólido para formação da fase (Ag). Para a junta 25 Ag GO não foi realizado ensaio de DSC, sendo o caminho de solidificação proposto a partir da observação das fases no MEV-BSE, onde o caminho mais provável deve ser com a solidificação primária da fase (Ag),

seguida pela transformação em estado sólido originando a fase (Ag) e logo após uma outra transformação em estado sólido que formaria as agulhas do microconstituente eutético, denominada aqui por α' -Ag. A partir disso, os caminhos de solidificação para cada uma das juntas brasadas podem ser escritos da seguinte forma:

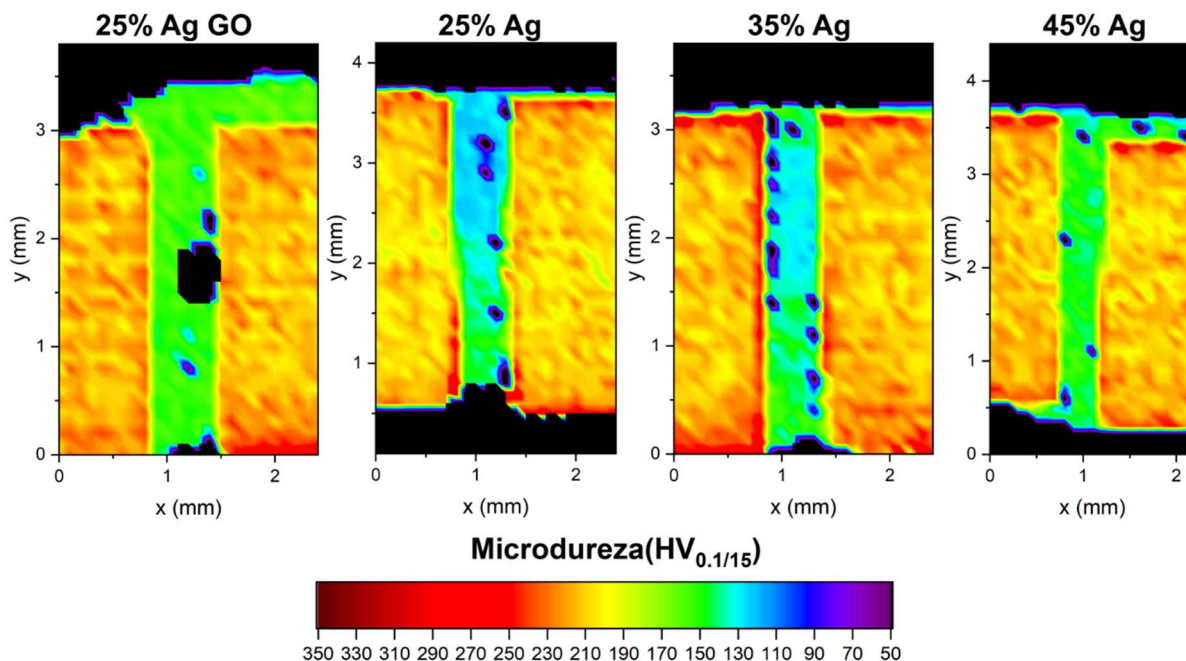


5.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DAS JUNTAS BRASADAS

5.5.1 Ensaio de Microdureza Vickers

Foi realizado um mapa de microdureza em cada uma das amostras para verificar se as mudanças microestruturais observadas na seção 5.4.2, principalmente para as condições com 25% e 35% Ag, afetaram as propriedades de microdureza ao longo da junta. Além disso, foi importante observar se houveram mudanças no comportamento em relação aos valores obtidos do material como recebido, seção 0. A Figura 46 apresenta os mapas obtidas para as quatro condições.

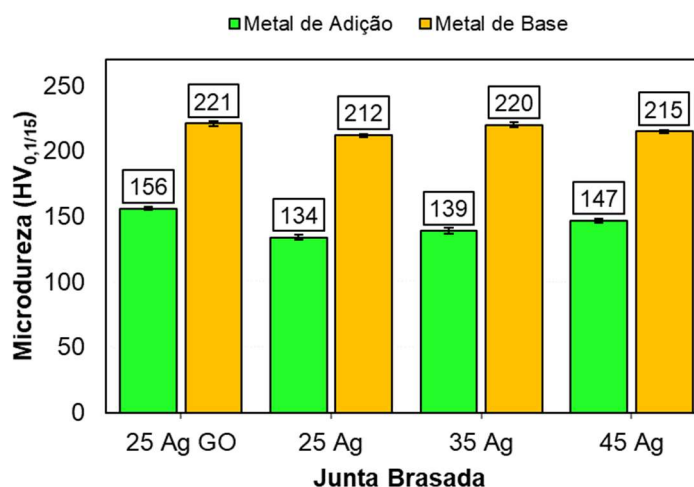
Figura 46 - Mapa de microdureza Vickers das juntas brasadas para as quatro condições de metal de adição utilizadas



Fonte: O autor (2021).

Como observa-se na Figura 46 a junta com 25% Ag GO e 45% Ag são as que apresentam os maiores valores de microdureza e os valores se mantêm homogêneos em toda a junta, o que se deve a microestrutura uniforme formada para essas condições. Em contrapartida, as juntas com 25% e 35% Ag apresentam uma pequena diferença de microdureza que pode ser observada entre as regiões superior e inferior da junta brasada, fato esse que novamente está ligado ao desenvolvimento microestrutural heterogêneo observado na Figura 32 e Figura 33. Visando obter dados mais concretos sobre a microdureza de cada junta brasada, foram separadas todas as medidas de microdureza do metal de adição e metal de base para obter uma microdureza média em cada região individualmente. A Figura 47 apresenta o gráfico com as médias de microdureza obtidas no metal de adição e metal de base para cada condição de junta brasada.

Figura 47 - Dados quantitativos de microdureza para cada condição de junta brasada.



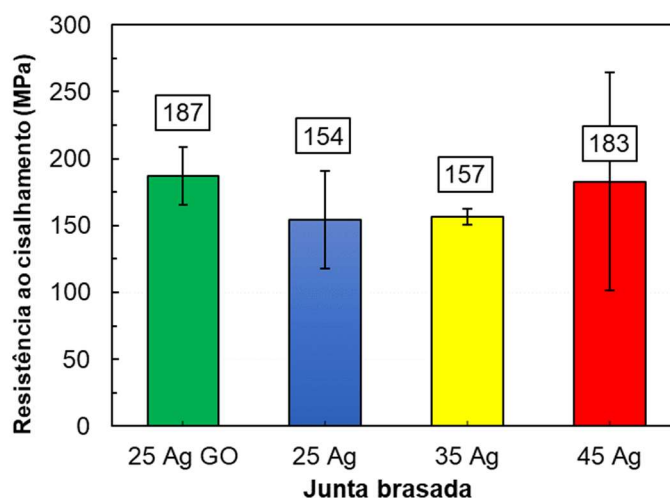
Fonte: O autor (2021).

A partir dos dados quantitativos observados na Figura 47 pode-se observar de forma concreta que a condição a condição 45 Ag apresentou maiores valores de microdureza em relação as condições 25 Ag e 35 Ag, com valores percentuais de 9,7% e 5,8%, respectivamente. Esse comportamento foi diferente do verificado na seção 5.1.2 para as microdureza dos metais de adição, indicando que os dados antes do processo não vão necessariamente predizer as condições pós-brasagem. Além disso, a condição 25 Ag GO apresentou maior valor médio de microdureza com um percentual de 16,4% se comparado com a condição 25 Ag. Sendo que esse aumento de dureza está relacionado com a homogeneização e o refinamento microestrutural observado na Figura 35 provocado pelo óxido de grafeno servindo como agente nucleante. Com isso, conclui-se que a adição de GO no metal de adição com 25% Ag, permite melhorar a propriedade de dureza da junta brasada.

5.5.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento

O ensaio de resistência ao cisalhamento foi realizado nas juntas brasadas visando avaliar a influência do teor de prata na resistência da junta e também avaliar se a adição de óxido de grafeno no metal de adição com 25% Ag promove uma melhoria das propriedades mecânicas. A Figura 48 apresenta os resultados obtidos nos ensaios para as juntas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag.

Figura 48 - Resistência ao cisalhamento das juntas brasadas 25 Ag GO, 25 Ag, 35 Ag e 45 Ag.



Fonte: O autor (2021).

A partir dos valores de resistência observados na Figura 48 nota-se que o aumento do teor de prata no metal de adição promove um aumento da propriedade de resistência ao cisalhamento da junta brasada, tomando como base os valores médios. Esse aumento pode estar associado ao maior refinamento microestrutural que foi observado na junta brasada 45 Ag na Figura 40. Além disso, essa condição apresenta melhor molhabilidade, o que contribui para uma junta com maiores possibilidades de preenchimento completo e, portanto, mais forte. Entretanto, na literatura é observado um comportamento oposto ao observado, Cao *et al.* (2011) que estudou metais de adição à base de prata com teores de 25%, 35% e 45%, obteve menor desempenho da última condição, o que ocorreu devido à grande presença de microconstituente eutético na junta brasada. Li *et al.* (2005) e Li *et al.* (2007) também observaram a diminuição da resistência mecânica com o aumento do teor de prata usado no metal de adição para união de ligas de memória de forma. Essa redução deve estar relacionada também com um aumento de ductibilidade provocado pelo aumento do teor de prata (WANG e XUE, 2016). Com relação a presença de Sn no metal de adição, é observado que seu aumento tende a melhorar o desempenho mecânico do metal de adição (WIERZBICKI *et al.*, 2011). Por fim, a junta brasada 25 Ag GO mostrou bons resultados com o maior valor de resistência tomando como base a média das medidas. Esse resultado se deve também a microestrutura mais refinada para essa condição. Do ponto de vista estatístico, é difícil comparar o desempenho de

cada condição de junta brasada, dessa forma, é necessário a realização de mais ensaios para diminuir o erro padrão associado as medidas.

6 CONCLUSÕES

A brasagem de aço inoxidável 304 por tocha oxiacetilênica usando metais de adição à base de prata foi realizada. Foi possível fabricar juntas com espaçamentos de aproximadamente 0,2 mm - 0,5 mm, o que está dentro da faixa de valores indicado para brasagem usando método manual de aquecimento. Além disso, foi fabricado com sucesso o metal de adição com baixo teor relativo de prata, 25 Ag GO, e a brasagem foi realizada de com sucesso.

As análises visuais tanto das regiões de topo e seção transversal das juntas brasadas revelaram que o processo usando tocha oxiacetilênica deve ser realizado com bastante perícia. A superfície deve estar com uma preparação adequada para remoção da camada de óxidos, caso contrário ocorre uma maior formação de porosidade, inerente ao processo, e até de trincas. Dentre os metais de adição estudados, como esperado, o metal de adição 45 Ag apresenta melhor molhabilidade, o que permite um melhor preenchimento da junta brasada. Observou-se ainda que adição de GO no metal de adição com 25 Ag desfavoreceu um pouco a molhabilidade, mas não de forma que dificultasse a execução da junta brasada.

A partir da análise microestrutural por MO, constatou-se a presença de uma heterogeneidade microestrutural desde a região superior até a região inferior da junta brasada para as condições 25 Ag e 35 Ag. Em outro ponto, a adição de GO no metal de adição 25 Ag melhorou as características microestruturais, permitindo refinar e homogeneizar a microestrutura. Na análise por MEV foi verificado que todas as juntas brasadas apresentavam fases de solução sólida de prata, solução sólida de cobre e microconstituente eutético. A junta 25 Ag GO apresentou um microconstituente eutético com a fase prata na forma de agulhas. Adicionalmente, foi observado penetração intergranular em todas juntas brasadas, representada pelo acúmulo de prata no contorno de grão do metal de base. Fenômeno esse que foi mais acentuado para a condição 25 Ag e 25 Ag GO devido a uma menor taxa de resfriamento no processo de solidificação da junta brasada.

A análise de microdureza Vickers nas juntas brasadas apresentou concordância com os resultados obtidos nas análises microscópicas. Nas juntas 25

Ag e 35 Ag foi observado que a região superior da junta apresentava menor microdureza em relação a região inferior, o que se deve ao fato de a microestrutura estar mais refinada na região inferior. A junta 45 Ag apresentou valores de microdureza quase constantes devido sua microestrutura mais homogênea. Por fim, a condição 25 Ag GO apresentou também valores quase constantes e valores superiores em relação a condição sem GO. A partir disso, pode-se afirmar que a adição de GO no metal de adição permitiu melhorar a propriedade de dureza em comparação com todas as outras condições estudadas.

Com relação ao desempenho mecânico das juntas brasadas, foi observado um desacordo com a literatura em relação a variação do teor de prata. O aumento do teor de prata no metal de adição tendeu a aumentar a resistência mecânica da junta brasada devido a microestrutura mais refinada e a melhor condição de preenchimento favorecida pela maior molhabilidade da junta 45 Ag. Por fim, a junta brasada com adição de GO no metal de adição com 25% Ag apresentou o melhor desempenho mecânico de todas as condições estudadas tomando como referência a média das medidas. Entretanto, deve-se realizar mais ensaios mecânicos para verificar se com a diminuição do erro padrão a condição 25 Ag GO ainda se mantém superior as outras.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir, algumas sugestões de trabalhos futuros são dadas:

- Estudar os mecanismos relacionados a formação de porosidade na brasagem por tocha oxiacetilênica para diferentes teores de prata;
- Estudar o efeito da variação do teor de óxido de grafeno na molhabilidade do metal de adição com 25% de teor de prata;
- Estudar o efeito da variação do teor de óxido de grafeno nas características microestruturais e desempenho mecânico de juntas brasadas usando o metal de adição com 25% de teor de prata;
- Realizar uma análise de viabilidade econômica do uso de óxido de grafeno no metal de adição com 25% de conteúdo de prata;
- Avaliar as propriedades de fadiga de uniões do aço inoxidável 304 usando metais de adição à base de prata com diferentes conteúdos de prata;

REFERÊNCIAS

AEROTD, E. DE A. C. **Sistemas Pneumáticos, Pressurização, de Ar Condicionado e de Oxigênio**. Florianópolis: AeroTD, 2015a.

AEROTD, E. DE A. C. **Soldagem**. Florianópolis: AeroTD, 2015b.

AFS-300, F. **Acceptable Methods, Techniques, and Practices - Aircraft Alterations**. [s.l.] Federal Administration Aviation, 3 mar. 2008.

AFS-640, F. **Acceptable Methods, Techniques, and Practices - Aircraft Inspection and Repair**. [s.l.] Federal Administration Aviation, 8 set. 1998.

AMERICAN WELDING SOCIETY, A. **Brazing Handbook** Committee on Brazing and Soldering, , 1991.

AMERICAN WELDING SOCIETY, A. **AWS A5.8/A5.8M Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding** Committee on Filler Metals and Allied Materials, , 2004. . Acesso em: 15 maio. 2020.

AMERICAN WELDING SOCIETY, A. **AWS C3.2M/C3.2 Standard Method for Evaluating the Strength of Brazed Joints**. [s.l.] Comitee on Brazing and Soldering, 2008.

AMERICAN WELDING SOCIETY, A. **AWS B2.2/B2.2M Specification for Brazing Procedure and Performance Qualification**. [s.l.] Comitee on Procedure and Performance Qualification, 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY, A. **AWS A5.31 Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding**. [s.l.] American Welding Society (AWS) A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials, 2012.

AMERICAN WELDING SOCIETY, A. **AWS C3.4M/C3.4 Specification for Torch Brazing**. [s.l.] Comitee on Brazing and Soldering, 2015.

ANDRADE CENTENO, D. M. **Análise microestrutural de junta brasada de aço inoxidável duplex UNS S32101, UNS S32304, UNS S32750 e UNS S32707 com metal de adição a base de níquel**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 13 set. 2013.

ANIL KUMAR, S. V.; GANDHINATHAN, R. Optimization of process parameters for titanium alloy to itself and stainless steel brazed joints using BAg22 filler metal. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785320320150, abr. 2020.

ASM INTERNATIONAL (ED.). **ASM handbook: Alloy Phase Diagrams**. 10th editon ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990. v. 3.

ASTUDILLO, M. R. N.; NICOLÁS, M. N.; RUZZANTE, J.; GÓMEZ, M. P.; FERRARI, G. C.; PADOVESE, L. R.; PUMAREGA, M. I. L. Correlation between Martensitic

Phase Transformation and Magnetic Barkhausen Noise of AISI 304 Steel. **Procedia Materials Science**, v. 9, p. 435–443, 2015.

BANSOD, A. V.; PATIL, A. P.; MOON, A. P.; SHUKLA, S. Microstructural and Electrochemical Evaluation of Fusion Welded Low-Nickel and 304 SS at Different Heat Input. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 26, n. 12, p. 5847–5863, dez. 2017.

BARLOW, L. D.; DU TOIT, M. Effect of Austenitizing Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of Martensitic Stainless Steel AISI 420. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 21, n. 7, p. 1327–1336, 1 jul. 2012.

CAO, J.; ZHANG, L. X.; WANG, H. Q.; WU, L. Z.; FENG, J. C. Effect of Silver Content on Microstructure and Properties of Brass/steel Induction Brazing Joint Using Ag-Cu-Zn-Sn Filler Metal. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 27, n. 4, p. 377–381, abr. 2011.

CHEN, Y.; YUN, D.; SUI, F.; LONG, W.; ZHANG, G.; LIU, S. Influence of sulphur on the microstructure and properties of Ag–Cu–Zn brazing filler metal. **Materials Science and Technology**, v. 29, n. 10, p. 1267–1271, out. 2013.

CHEN, Y.-Y.; DUH, J.-G.; CHIOU, B.-S. The effect of substrate surface roughness on the wettability of Sn-Bi solders. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 11, n. 4, p. 279–283, 1 jun. 2000.

CHENG, S.; HUANG, C.-M.; PECHT, M. A review of lead-free solders for electronics applications. **Microelectronics Reliability**, v. 75, p. 77–95, ago. 2017.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGrawHill, 1986. v. 3.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

CHO, H.-H.; HAN, H. N.; HONG, S.-T.; PARK, J.-H.; KWON, Y.-J.; KIM, S.-H.; STEEL, R. J. Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 6, p. 2889–2894, 15 mar. 2011.

DAVIS, J. R. Introduction to Stainless Steels. *In*: **Stainless Steels**. [s.l.] ASM International, 2000. p. 1–6.

DEV, S. C.; SIVARAMAKRISHNAN, C. S. An indigenous technology for a silver brazing alloy. **Materials & Design**, v. 17, n. 2, p. 75–78, jan. 1996.

DIN, D. I. FÜR N. **DIN EN 1044 / Brazing - Filler Metals: English version of DIN EN 1044**, 1999.

E04 COMMITTEE. **Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. [s.l.] ASTM International, 2017. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E384-17>>. Acesso em: 4 jun. 2021.

ESMATI, K.; OMIDVAR, H.; JELOKHANI, J.; NADERI, M. Study on the microstructure and mechanical properties of diffusion brazing joint of C17200 Copper Beryllium alloy. **Materials & Design**, v. 53, p. 766–773, jan. 2014.

EUSTATHOPOULOS, N.; HODAJ, F.; KOZLOVA, O. 1 - The wetting process in brazing. *In*: SEKULIĆ, D. P. (Ed.). . **Advances in Brazing**. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. [s.l.] Woodhead Publishing, 2013. p. 3–30.

EUSTATHOPOULOS, N.; NICHOLAS, M. G.; DREVET, B. **Wettability at High Temperatures**. Burlington: Elsevier, 1999.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, F. **Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe**. [s.l.] Federal Aviation Administration, 2018. v. 2.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, F. **Oxygen Equipment: Use in General Aviation Operations** Federal Aviation Administration, , [s.d.].

GANGADHARAN, S.; SIVAKUMAR, D.; VENKATESWARAN, T.; KULKARNI, K. Evolution of microstructure in brazed joints of austenitic-martensitic stainless steel with pure silver obtained with Ag-27Cu-5Sn brazing filler material. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 47, n. 12, p. 6148–6159, dez. 2016.

GARCÍA-VÁZQUEZ, F.; GUZMÁN-FLORES, I.; GARZA, A.; ACEVEDO, J. Evolution of microstructure of 304 stainless steel joined by brazing process. **MRS Proceedings**, v. 1276, p. 12, 2010.

GARZÓN, C. M.; RAMIREZ, A. J. Growth kinetics of secondary austenite in the welding microstructure of a UNS S32304 duplex stainless steel. **Acta Materialia**, v. 54, n. 12, p. 3321–3331, 1 jul. 2006.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of Graphitic Oxide. **Journal of the American Chemical Society**, v. 80, n. 6, p. 1339–1339, mar. 1958.

INA, K.; KOIZUMI, H. Penetration of liquid metals into solid metals and liquid metal embrittlement. **Materials Science and Engineering: A**, v. 387–389, p. 390–394, dez. 2004.

INSTITUTO DE AVIAÇÃO CIVIL, D. **Matérias Básicas**. Rio de Janeiro: Instituto de Aviação Civil, 2002.

ISFAHANY, A. N.; SAGHAFIAN, H.; BORHANI, G. The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509, n. 9, p. 3931–3936, 3 mar. 2011.

JACOBSON, D. M.; HUMPSTON, G. **Principles of brazing**. Materials Park, NY: ASM International, 2005.

KHORRAM, A.; GHOREISHI, M.; J., M.; RAHIMI, H. Comparative study on laser brazing of austenitic and martensitic stainless steels with silver-based filler metal. **Metallic Materials**, v. 53, n. 01, p. 43–50, 2016.

KROUPA, A.; ANDERSSON, D.; HOO, N.; PEARCE, J.; WATSON, A.; DINSDALE, A.; MUCKLEJOHN, S. Current Problems and Possible Solutions in High-Temperature Lead-Free Soldering. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 21, n. 5, p. 629–637, maio 2012.

LEE, I.-K.; SHEU, H.-H.; HSU, H.-Y. The effects of graphene content on the mechanical properties and thermal conductivity of Inconel 718 superalloy brazed using BNi-2/graphene composite filler metal. **Results in Physics**, v. 16, p. 102828, mar. 2020.

LEFFLER, B. **STAINLESS - stainless steels and their properties**. 2. ed. [s.l.: s.n.]. LI, M. G.; SUN, D. Q.; QIU, X. M.; LIU, J. B.; MIAO, K.; WU, W. C. Effects of silver based filler metals on microstructure and properties of laser brazed joints between TiNi shape memory alloy and stainless steel. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 2, p. 183–188, fev. 2007.

LI, M. G.; SUN, D. Q.; QIU, X. M.; YIN, S. Q. Effect of tin on melting temperature and microstructure of Ag–Cu–Zn–Sn filler metals. **Materials Science and Technology**, v. 21, n. 11, p. 1318–1322, nov. 2005.

LIAN, X.; QU, W.; WANG, G. Grain boundary penetration behavior analysis of OFC brazed with AgCu28 brazing filler. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, n. 40, p. 717–720, 2014.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2005.

LIU, C. C.; OU, C. L.; SHIUE, R. K. The microstructural observation and wettability study of brazing Ti-6Al-4V and 304 stainless steel using three braze alloys. p. 11, 2002.

LIU, D.; SONG, Y.; ZHOU, Y.; SONG, X.; FU, W.; FENG, J. Brazing of C/C composite and Ti-6Al-4V with graphene strengthened AgCuTi filler: Effects of graphene on wettability, microstructure and mechanical properties. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 31, n. 7, p. 1602–1608, jul. 2018.

LO, K. H.; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 65, n. 4–6, p. 39–104, 29 maio 2009.

MA, C.; XUE, S.; WANG, B. Study on novel Ag-Cu-Zn-Sn brazing filler metal bearing Ga. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 688, p. 854–862, dez. 2016.

MARQUES, I. J. **Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos com Materiais 2D de Óxido de Grafeno para Soldagem e Revestimento**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2021.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MARSHALL, P. **Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 1984.

METCO, S. **An Introduction to Brazing**. v. 3, n. Oerlikon Metco, p. 10–24, 2011.

MOHANDAS, T.; MADHUSUDHAN REDDY, G.; NAVEED, M. A comparative evaluation of gas tungsten and shielded metal arc welds of a “ferritic” stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 94, n. 2, p. 133–140, 29 set. 1999.

NOGARA, J.; ZARROUK, S. J. Corrosion in geothermal environment Part 2: Metals and alloys. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1347–1363, fev. 2018.

OLSON, D. L.; SIEWERT, T. A.; LIU, S.; EDWARDS, G. R. **Welding Brazing and Soldering**. [s.l.] ASM International, 1993. v. 6

O’SULLIVAN, D.; COTTERELL, M.; MESZAROS, I. The characterisation of work-hardened austenitic stainless steel by NDT micro-magnetic techniques. **NDT & E International**, v. 37, n. 4, p. 265–269, 2004.

OUTOKUMPU STAINLESS, A. Handbook of stainless steel. **Avesta Research Centre, Avesta, Sweden**, 2013.

PADILHA, A. F.; RIOS, P. R. Decomposition of Austenite in Austenitic Stainless Steels. **ISIJ International**, v. 42, n. 4, p. 325–327, 2002.

PALIT SAGAR, S.; RAVI KUMAR, B.; DOBMANN, G.; BHATTACHARYA, D. K. Magnetic characterization of cold rolled and aged AISI 304 stainless steel. **NDT & E International**, v. 38, n. 8, p. 674–681, 1 dez. 2005.

PAUL, A.; BINNER, J. G. P.; VAIDHYANATHAN, B.; HEATON, A. C. J.; BROWN, P. M. Heat flux mapping of oxyacetylene flames and their use to characterise Cf-HfB₂ composites. **Advances in Applied Ceramics**, v. 115, n. 3, p. 158–165, 2 abr. 2016.

PHILIPS, N. R.; LEVI, C. G.; EVANS, A. G. Mechanisms of microstructure evolution in an austenitic stainless steel bond generated using a quaternary braze alloy. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 39, n. 1, p. 142–149, jan. 2008.

PRASAD, K. S.; RAO, C. S.; RAO, D. N. A Review on Welding of AISI 304L Austenitic Stainless Steel. **Journal for Manufacturing Science and Production**, v. 14, n. 1, p. 1–11, 30 abr. 2014.

RAJASEKHAR, A.; MADHUSUDHAN REDDY, G.; MOHANDAS, T.; MURTI, V. S. R. Influence of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 431 martensitic stainless steel electron beam welds. **Materials & Design**, v. 30, n. 5, p. 1612–1624, 1 maio 2009.

ROBERTS, M.; WANG, K.; GUZAS, E.; TUCKER, W.; LOCKHART, P. Induction Infrared Thermography for Non-destructive Evaluation of Welding-Induced Sensitization in Stainless Steels. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 40, n. 1, p. 19, 4 fev. 2021.

ROBERTS, P. **Industrial brazing practice**. 2. ed. New York: CRC Press, 2013.

RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R. L. **Handbook of Induction Heating, Second Edition**. 2. ed. [s.l.] CRC Press, 2017.

SADEK, A. Z.; EL-SHEIKH, A. M. **Failure analysis of SS304 weldments by metallurgically enhanced stress corrosion cracking in laboratory environments**CORROSION 2000. **Anais...**NACE International, 2000

SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M. S. Internal Friction on AISI 304 Stainless Steels with Low Tensile Deformations at Temperatures between – 50 and 20 C. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2010, p. 1–8, 2010.

SANTOS, T. F. DE A.; LÓPEZ, E. A. T.; FONSECA, E. B. DA; RAMIREZ, A. J. Friction stir welding of duplex and superduplex stainless steels and some aspects of microstructural characterization and mechanical performance. **Materials Research**, v. 19, p. 117–131, 12 fev. 2016.

SANTOS, T. F. DE A.; TORRES, E. A.; RAMIREZ, A. J. Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível de Aços Inoxidáveis Duplexa. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, p. 59–69, mar. 2016.

SCHWARTZ, M. M. **Brazing**. 2. ed ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003.

SHAJI, S.; SANTHOSH KUMAR, R.; THOMAS THARIAN, K.; AMRUTH, M.; MANIMARAN, A.; BABU, J. Study the effect of thermal cycling of brazing and post-brazing processes on Cu-Ni alloy. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 2626–2630, 2020.

SIQUEIRA, L. O.; SILVA, A. C. S. DA; MARQUES, I. J.; GONZALEZ, C. H.; ABREU SANTOS, T. F. DE. Microstructural Evaluation of Copper Brazed Joints Using Silver-Based Filler Metal. **Metallography, Microstructure, and Analysis**, 23 mar. 2021.

SOLTANI TASHI, R.; AKBARI MOUSAVI, S. A. A.; MAZAR ATABAKI, M. Diffusion brazing of Ti–6Al–4V and austenitic stainless steel using silver-based interlayer. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 54, p. 161–167, fev. 2014.

SUI, F.; LONG, W.; LIU, S.; ZHANG, G.; BAO, L.; LI, H.; CHEN, Y. Effect of calcium on the microstructure and mechanical properties of brazed joint using Ag–Cu–Zn brazing filler metal. **Materials & Design**, v. 46, p. 605–608, abr. 2013.

TAJFAR, M.; GANJEH, E.; MIRBAGHERI, M. H. Evaluation of copper brazed joint failure by thermal-fatigue test applicable in heat exchangers. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 656, p. 347–356, jan. 2016.

TOURKI, Z.; BARGUI, H.; SIDHOM, H. The kinetic of induced martensitic formation and its effect on forming limit curves in the AISI 304 stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, n. 3, p. 330–336, 20 ago. 2005.

TSENG, K.-H.; HSU, C.-Y. Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 3, p. 503–512, 1 mar. 2011.

VASHISHTHA, H.; TAIWADE, R. V.; SHARMA, S.; MARODKAR, A. S. Microstructural and Mechanical Properties Evolution of Bimetallic Cr-Ni and Cr-Mn-Ni Stainless Steel Joints. **Metallography, Microstructure, and Analysis**, v. 8, n. 3, p. 359–369, 1 jun. 2019.

VASHISHTHA, H.; TAIWADE, R. V.; SHARMA, S.; PATIL, A. P. Effect of welding processes on microstructural and mechanical properties of dissimilar weldments between conventional austenitic and high nitrogen austenitic stainless steels. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 49–59, jan. 2017.

VENKATESWARAN, T.; XAVIER, V.; D., S.; PANT, B.; G.D., J. R. Brazing of stainless steels using Cu-Ag-Mn-Zn braze filler: Studies on wettability, mechanical properties, and microstructural aspects. **Materials & Design**, v. 121, p. 213–228, maio 2017.

WANG, H.; XUE, S. Effect of Ag on the properties of solders and brazing filler metals. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 27, n. 1, p. 1–13, jan. 2016.

WANG, X.; LI, S.; PENG, J. Comparative study on thermodynamic characteristics of AgCuZnSn brazing alloys. **Materials Research Express**, v. 5, n. 1, p. 016522, 23 jan. 2018.

WANG, X.; PENG, J.; CUI, D. Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel/Brass Joints Brazed by Sn-Electroplated Ag Brazing Filler Metals. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 27, n. 5, p. 2233–2238, maio 2018.

WAY, M.; WILLINGHAM, J.; GOODALL, R. Brazing filler metals. **International Materials Reviews**, v. 65, n. 5, p. 257–285, 3 jul. 2020.

WIERZBICKI, L.; MALEC, W.; STOBRAWA, J.; CWOLEK, B.; JUSZCZYK, B. Studies Into New, Environmentally Friendly Ag-Cu-Zn-Sn Brazing Alloys of Low Silver Content. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 56, n. 1, 1 jan. 2011.

WINIOWSKI, A.; RÓŻAŃSKI, M. Impact of tin and nickel on the brazing properties of silver filler metals and on the strength of brazed joints made of stainless steels. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 56, n. 1, p. 147–158, 2011.

WU, J.; XUE, S.; YAO, Z.; LONG, W. Study on Microstructure and Properties of 12Ag–Cu–Zn–Sn Cadmium-Free Filler Metals with Trace in Addition. **Crystals**, v. 11, n. 5, p. 557, 16 maio 2021.

XUE, P.; ZOU, Y.; HE, P.; PEI, Y.; SUN, H.; MA, C.; LUO, J. Development of Low Silver AgCuZnSn Filler Metal for Cu/Steel Dissimilar Metal Joining. **Metals**, v. 9, n. 2, p. 198, 8 fev. 2019.

ZAHARINIE, T.; HUDA, Z.; IZUAN, M. F.; HAMDI, M. Development of optimum process parameters and a study of the effects of surface roughness on brazing of copper. **Applied Surface Science**, v. 331, p. 127–131, mar. 2015.

ZHONGMIN, L.; SONGBAI, X.; XIANPENG, H.; LIYONG, G.; WENHUA, G. Study on Microstructure and Property of Brazed Joint of AgCuZn-X(Ga, Sn, In, Ni) Brazing Alloy. **Rare Metal Materials and Engineering**, v. 39, n. 3, p. 397–400, mar. 2010.

ZHU, W.; ZHANG, H.; GUO, C.; LIU, Y.; RAN, X. Wetting and brazing characteristic of high nitrogen austenitic stainless steel and 316L austenitic stainless steel by Ag–Cu filler. **Vacuum**, v. 166, p. 97–106, 1 ago. 2019.