

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO E DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM
MAG DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020

por

José Hernando Díaz Beltrán

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2019

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo autor.

Beltrán, José Hernando
INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO E DO GÁS DE PROTEÇÃO
NA SOLDAGEM MAG DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020 / José
Hernando Beltrán. -- 2019.
30 f.
Orientadora: Cintia Cristiane Petry Mazzaferro.

Coorientadora: Liz Karen Herrera Quintero.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Eletrodo de soldagem. 2. Gás de proteção. 3.
Geometria do metal de solda. 4. Microestrutura. 5.
Dureza. I. Petry Mazzaferro, Cintia Cristiane, orient.
II. Herrera Quintero, Liz Karen, coorient. III.
Título.

José Hernando Díaz Beltrán

INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO E DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM
MAG DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof^ª. Dr. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Co-orientador: Prof^ª. Ph.D. Liz Karen Herrera Quintero

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Dr. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. José Antônio Mazzaferro

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

A minha mãe pelo amor, apoio constante e incondicional, bons desejos e bênçãos.

A meu pai e meus irmãos por seus bons desejos.

A minha avó por seus grandes conselhos e bênçãos.

A minha namorada por seu amor, seus conselhos, apoio incondicional e motivação neste grande projeto acadêmico.

A todos do *Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC)* que sempre estiveram dispostos a me ajudar.

DEDICATÓRIA

Este trabalho faz parte de um grande passo na minha vida e é dedicado a minha família, minha namorada e todos aqueles que desejaram o melhor para mim.

Beltrán, José H. **INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO E DO GÁS DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM MAG DE CHAPAS DE AÇO SAE 1020**. 2019. 30. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do arame-eletrodo consumível e do gás de proteção na geometria, microestrutura e dureza de chapas de aço SAE 1020 soldadas com o processo MAG (Metal Active Gas). Foram utilizados parâmetros de soldagem de diferentes valores de corrente, tensão e Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP) para cada tipo de arame (AWS ER70S-6, AWS ER80S-G, AWS ER110S-G e AWS ER120S-G). Os gases de proteção foram C25 (Ar + 25% CO₂) e 100% CO₂, a abertura entre chapas foi de 1,2 mm sem chanfro e, a velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame e vazão, foram valores fixos para todas as juntas soldadas. Os resultados mostraram que a geometria do cordão foi influenciada pelo gás de proteção quanto à diluição, nível de salpico e penetração no centro e nas bordas do cordão, sendo os valores destes maiores quando o gás 100% CO₂ foi utilizado. Também os parâmetros de soldagem como tensão, corrente e DBCP tiveram influência nas características geométricas como largura, reforço e penetração do cordão de solda. Já quanto ao arame, resultou que a composição química destes teve influência na microestrutura e na dureza do metal de solda. Com o emprego de um arame com maior resistência mecânica, houve um aumento na quantidade de ferrita acicular formada, e o metal de solda apresentou maior dureza.

PALAVRAS CHAVE: Eletrodo de soldagem, gás de proteção, geometria do metal de solda, microestrutura, dureza.

Beltrán, José H. **INFLUENCE OF THE SOLID WIRE AND SHIELDING GAS ON MAG WELDING OF SAE 1020 STEEL SHEETS**. 2019. 30. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the effect of solid wire and the shielding gas on geometry, microstructure and hardness of SAE 1020 steel sheets welded with process MAG (Metal Inert Gas). Parameters of welding as current, voltage and Contact Tip to Work Distance (CTWD) were used for each electrode (AWS ER70S-6, AWS ER80S-G, AWS ER110S-G e AWS ER120S-G). The shielding gases were C25 (Ar + 25% CO₂) and 100% CO₂, the opening between plates were 1,2 mm with square groove. The welding speed, wire feed speed and flow of shielding gas values were fixed for each one of the welded joints. The results showed that the welded geometry of the bead was influenced by shielding gas related to dilution, level of spatter and penetration into center and the edges of the weld bead being these values with 100% CO₂ higher than C25. The welding parameters as voltage, current and CTWD had influence on geometry characteristics as width, reinforcement and penetration of the welded beads. Related to electrode it was observed that the chemical composition had influence on microstructure and hardness of the welded beads. With the employ of an electrode with high mechanical resistance there was an increase of the amount of acicular ferrite formed and the weld metal exhibited higher hardness.

KEYWORDS: Solid wire, shielding gas, geometry of weld metal, microstructure, hardness.

NOMENCLATURA

<i>Ar</i>	Argônio	
<i>AWS</i>	American Welding Society	
<i>C</i>	Corrente	A
<i>C25</i>	Argônio+25%Dióxido de carbono	
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono	
<i>CP</i>	Corpo de Prova	
<i>CTWP</i>	Contact Tip to Work Distance	
<i>D</i>	Distância entre cada indentação dos cordões de solda	mm
<i>DBCP</i>	Distância do Bico de Contato à Peça	
<i>E</i>	Energia de soldagem	kJ/cm
<i>FA</i>	Ferrita Acicular	
<i>FS(A)</i>	Ferrita de Segunda Fase Alinhada	
<i>GMAW</i>	Gas Metal Arc Welding	
<i>I</i>	Distância da linha das indentações até superfície superior das chapas do aço	mm
<i>L</i>	Largura	mm
<i>LS&TC</i>	Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas	
<i>MAG</i>	Metal Active Gas	
<i>MB</i>	Metal Base	
<i>MIG</i>	Metal Inert Gas	
<i>O₂</i>	Oxigênio	
<i>P</i>	Penetração	mm
<i>PF(G)</i>	Ferrita de Contorno de Grão	
<i>PF(I)</i>	Ferrita Poligonal Intragranular	
<i>R</i>	Reforço	mm
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers	
<i>T</i>	Tensão	V
<i>v</i>	Velocidade de soldagem	mm/s
<i>ZAC</i>	Zona Afetada pelo Calor	
<i>ZF</i>	Zona Fundida	
δ	Diluição	%
η	Rendimento térmico	%

INDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1. Processo MIG/MAG de soldagem.....	2
2.2. Gás de proteção.....	2
2.2.1. Argônio (Ar).....	2
2.2.2. Dióxido de carbono (CO ₂).....	2
2.2.3. Argônio + Dióxido de carbono (Ar + CO ₂).....	2
2.3. Parâmetros de soldagem.....	3
2.3.1. Tensão de soldagem.....	3
2.3.2. Corrente de soldagem.....	3
2.3.3. Velocidade de soldagem.....	4
2.4. Arame consumível.....	4
2.5. Energia de soldagem.....	4
2.6. Diluição.....	4
2.7. Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP).....	5
2.8. Microestrutura da zona fundida das juntas soldadas em aços carbono.....	5
3. METODOLOGIA.....	5
3.1. Materiais e métodos.....	5
3.1.1. Produção das juntas soldadas.....	5
3.1.2. Macrografia, micrografia e dureza da seção transversal dos CP.....	7
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	7
4.1. Avaliação da qualidade da superfície do cordão e macrografia dos CP.....	7
4.2. Avaliação da micrografia e dureza das juntas soldadas.....	12
5. CONCLUSÕES.....	14
6. TRABALHOS FUTUROS.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
A. APÊNDICE.....	16
ANEXO 1.....	19

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Geometria do cordão de solda e transferência de metal com os diferentes gases de proteção.....	3
Figura 2.2. Diluição medida na seção transversal de (a) um cordão depositado sobre chapa e (b) uma solda de topo.....	4
Figura 3.1. Geometria dos cordões de solda e localização das indentações na seção transversal dos CP. L: Largura, R: Reforço, P: Penetração, I: Distância da linha das indentações até superfície superior das chapas do aço e D: Distância entre cada indentação dos cordões de solda.....	7
Figura 4.1. Qualidade da superfície das juntas soldadas nos CP a) 1, b) 2 e c) 8.....	9
Figura 4.2. a) Energia de soldagem, b) diluição das soldas e c) representação gráfica da largura, penetração e reforço da solda dos corpos de prova...	9
Figura 4.3. Macrografia da seção transversal do CP a) 1 e b) 2.....	10
Figura 4.4. Macrografia da seção transversal do CP a) 4 e b) 5.....	11
Figura 4.5. Macrografia da seção transversal dos CP a) 7, b) 8 e c) 9.....	12
Figura 4.6. Identificação dos microconstituintes nos CP a) 1, b) 3, c) 9 e d) 10.....	13
Figura 4.7. Perfil de dureza dos CP a) 1, b) 3, c) 7 e d) 11.....	13
Figura A1. Cordão de solda dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11.....	16
Figura A2. Macrografia das juntas soldadas dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11 obtidas com lente de 8x.....	17
Figura A3. Micrografia dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11.....	17
Figura A4. Perfis de dureza das juntas soldadas dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11.....	18

INDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1. Composição química dos arames eletrodos em porcentagem de massa..	5
Tabela 3.2. Composição química do aço SAE 1020.....	6
Tabela 3.3. Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.....	6
Tabela 3.4. Parâmetros das condições de soldagem com o processo MAG para cada CP.....	6
Tabela 4.1. Geometria do cordão de solda e diluição calculada para cada CP.....	8

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) dadas suas vantagens comparado com outros processos de soldagem como de eletrodo revestido e apesar da sua evolução quanto ao seu emprego nos processos de fabricação e manutenção, continua sendo otimizado a fim de obter juntas soldadas com boa qualidade superficial, qualidade geométrica do cordão de solda, sem descontinuidades e alta resistência mecânica, ductilidade e tenacidade para garantir ótimas condições de serviço para o qual foi projetada.

A técnica MIG/MAG é um processo com maior taxa de deposição quando comparado com o eletrodo revestido, além de não gerar escória na superfície do cordão devido ao emprego de gases de proteção inertes ou ativos segundo o metal base. Este gás de proteção, de acordo com Moreira, 2008, influencia em características importantes que determinam a qualidade superficial, geométrica, e de propriedades do metal de solda: modo de transferência de metal do arame à peça, estabilidade do arco, propriedades mecânicas do cordão, entre outras.

Além do efeito do gás nas regiões do material de trabalho envolvidas no metal de solda, o arame-eletrodo consumível exerce uma influência na microestrutura e na dureza da zona fundida. De acordo com Bhadeshia, 2001, Farrar e Harrison, 1987, e os resultados obtidos por Giarollo, 2018, elementos na composição química do arame como o manganês e níquel, numa faixa de 0,6%-1,8%, alteram a microestrutura com o qual a dureza da zona fundida do cordão tem valores maiores no arame de maior composição de manganês e níquel que em um cordão com arame de menor ou sem conteúdo destes elementos.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do arame-eletrodo consumível e do gás de proteção na geometria, microestrutura e dureza do cordão de solda em aços carbono SAE 1020 utilizando o processo de soldagem MAG.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processo MIG/MAG de soldagem

A soldagem MIG/MAG é um processo de união de metais ferrosos ou não ferrosos que pode ser semiautomático ou robotizado. Este processo pertence ao grupo de processos GMAW (Gas Metal Arc Welding) no qual usa-se um arame eletrodo nu com uma proteção gasosa inerte ou ativa de acordo ao material que vai ser soldado. O processo MAG é utilizado para soldar materiais ferrosos com o uso de um gás de proteção ativo como CO₂ ou misturas deste com um gás inerte, como pode ser Argônio, e o processo MIG é utilizado para soldar materiais, tanto ferrosos como não ferrosos, com gás de proteção inerte.

2.2. Gás de proteção

O gás de proteção nos processos de soldagem influencia diretamente o desempenho e qualidade da operação. O principal objetivo do gás de proteção é proteger a poça de fusão da atmosfera evitando gerar óxidos, nitretos ou trincas induzidas por hidrogênio, principalmente nos casos da soldagem de aços de alta resistência. A contaminação da poça de fusão pode resultar em baixa resistência, descontinuidades nas juntas, entre outros. Outras funções do gás de proteção é fornecer estabilidade ao arco elétrico e abertura, além de afetar o tipo de transferência do metal de solda. [Alba, 2013]

Alguns gases de proteção usados no processo MAG se citam como segue:

2.2.1. Argônio (Ar)

O Argônio é um gás inerte que pode ser usado no processo de soldagem MAG misturado com outros gases inertes ou ativos segundo as características e especificações do requerimento. O Argônio propicia excelente estabilidade de arco e ótimos perfis do cordão de solda. Além disso, o Ar apresenta penetração reduzida, maior disponibilidade, baixa condutividade térmica, ideal para soldagem de chapas finas, arco estável e baixa quantidade de respingos [Alba, 2013; Moreira, 2008].

Para a soldagem dos aços, deve ser adicionado um gás oxidante (Oxigênio ou Dióxido de carbono) ao gás inerte. Isso torna o arco estável e reduz a quantidade de salpicos resultando num cordão com geometria conveniente. A geometria do cordão de solda é característica de cada elemento sendo que o Ar produz cordões com maior penetração no centro que nas bordas [Machado, 1996].

2.2.2. Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é um gás ativo e produz efeitos oxidantes nos processos de soldagem. Sua utilização é muito empregada na soldagem de aços. Comparado com outros gases de proteção pode-se empregar velocidades de soldagem maiores e penetração profunda. A desvantagem pode ser os altos níveis de salpico da solda. Suas características principais são boa velocidade de soldagem, alta condutividade térmica, ideal para soldagem de chapas grossas, excelente penetração, grande quantidade de respingos e arco instável [Alba, 2013; Moreira, 2008; Alves, 2009; Machado, 1996].

De acordo com Machado, 1996, o CO₂ puro pode ser empregado como gás de proteção na soldagem de aços ao carbono com observações como baixa tenacidade do metal de solda, alta taxa de deposição, pode ser utilizado com o modo de transferência de metal de solda em curto-circuito e globular, tem possibilidade de apresentar porosidade dependendo do conteúdo de desoxidantes contido no arame.

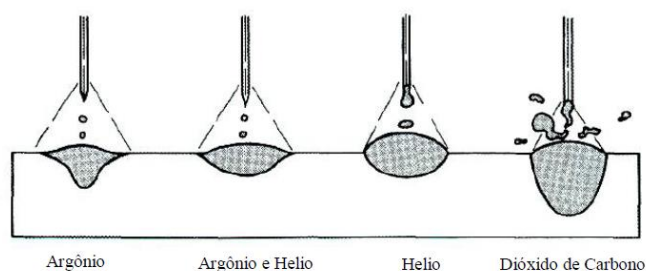
2.2.3. Argônio + Dióxido de carbono (Ar + CO₂)

As misturas de Ar e CO₂ são utilizadas principalmente em aço carbono de baixa liga, e com limitações, em soldagem de aços inoxidáveis. A adição do Argônio ao dióxido de carbono é para procurar diminuir os níveis de respingo do dióxido de carbono puro. Na juntas soldadas de aço ao carbono e alguns de baixa liga que utilizam um conteúdo de dióxido de carbono entre 10% e 30% no Argônio, a tenacidade diminui com o aumento do CO₂, e a transferência metálica é curto-circuito com qualquer proporção de CO₂, em relação aos aços inoxidáveis, ele é limitado em 5% [Alba, 2013; Machado, 1996].

“A soldagem dos aços ferrosos só é possível se o gás de proteção possuir um mínimo caráter oxidante. A ação do O₂ ou CO₂ ao Argônio, além de aumentar a fluidez do metal fundido, promove a existência de um grande número de pontos catódicos sobre a ponta do arame. De outra forma, no Argônio puro, seria produzido somente um ponto catódico, com movimento errático, depositando um cordão com geometria irregular e permitindo a contaminação pela atmosfera da poça de fusão” [Machado, 1996].

Na Fig. 2.1 apresenta-se a influência do gás de proteção no perfil geométrico e a transferência de metal.

Figura 2.1. Geometria do cordão de solda e transferência de metal com os diferentes gases de proteção [Alves, 2009]



2.3. Parâmetros de soldagem

Estas variáveis que podem ser ajustáveis tem influência notável sobre a geometria do cordão de solda, propriedades mecânicas, defeitos operacionais e estabilidade do arco [Machado, 1996].

2.3.1. Tensão de soldagem

A influência da tensão na soldagem é principalmente na largura do cordão de solda. Cordões de solda largos são alcançados com tensões altas. De uma forma geral, tensões baixas geram cordões estreitos e com maior penetração, sendo que o oposto é válido para tensões altas. A seleção da tensão de soldagem deve estar diretamente ligada à corrente de soldagem para que haja estabilidade do arco [Alba, 2013].

Uma muito baixa tensão pode causar porosidade, sobreposição (aos lados do cordão), cordão estreito e convexo. Um aumento excessivo deste parâmetro, faz com que o arco aumente proporcionalmente, causando porosidade, salpico e mordedura. Em ambos casos, a estabilidade do arco é prejudicada [Machado, 1996].

2.3.2. Corrente de soldagem

A corrente de soldagem tem influência direta sobre a taxa de fusão/deposição do arame, modo de transferência, penetração e reforço do cordão de solda. A corrente de soldagem está diretamente relacionado com a velocidade de alimentação do arame. Se a velocidade de

alimentação do arame altera-se, a corrente de soldagem o faz no mesmo sentido [Alba, 2013; Machado, 1996].

2.3.3. Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem influencia a energia de soldagem e, assim, a quantidade de calor cedida à peça. Velocidades de soldagem muito baixas, além de elevar o custo devido a maior taxa de deposição, podem causar problemas metalúrgicos devidos à energia de soldagem elevada. Velocidade de soldagem elevada resulta em menor penetração, reforço e largura do cordão. Velocidades excessivas provocam o aparecimento de mordeduras, falta de fusão e/ou falta de penetração do cordão de solda [Marques, 2009].

2.4. Arame consumível

De acordo com Machado, 1996, os fatores que mais tem influência na seleção do arame consumível, além de critérios mecânicos e metalúrgicos da junta, e custo, são: o gás utilizado, o modo desejado de transferência metálica, a posição de soldagem, o serviço que a junta executará, o meio ambiente, o estado da superfície do metal base, o estado de fornecimento do metal base tal como tratamento térmico ou outro processo prévio.

Os arames de aço usados com CO₂ como gás de proteção para o processo MAG contém na sua composição química maiores teores de silício e manganês para prover a sua ação desoxidante [Marques, 2009].

2.5. Energia de soldagem

A energia de soldagem é a razão entre a potência da fonte e a velocidade de soldagem. Esta energia apresenta alguns fatores que fazem que o valor desta seja menor ao determinado se o processo não tiver perdas e sua eficiência for de 100%. O coeficiente adimensional η (rendimento térmico) depende do processo, dos parâmetros de soldagem, das propriedades físicas dos materiais e a geometria das peças. Na Eq. 2.1 apresenta-se a expressão para calcular a energia de soldagem.

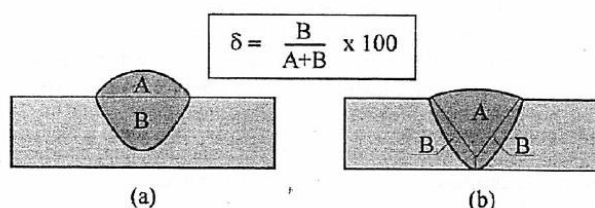
$$E = \eta \frac{T \cdot C}{v} \quad (2.1)$$

Onde T é a tensão, C é a corrente e v a velocidade de soldagem.

2.6. Diluição

A diluição define-se como quantidade em porcentagem do metal base na constituição da zona fundida e expressa-se como na Eq. 2.2. A composição química de uma solda não é a mesma que a composição química do metal de aporte depositado, devido à participação do metal base na constituição da zona fundida. A diluição é influenciada principalmente pela energia de soldagem entregue à junta [Alves, 2009].

Figura 2.2. Diluição medida na seção transversal de (a) um cordão depositado sobre chapa e (b) uma solda de topo [Marques, 2009].



$$\delta = (\text{massa fundida do metal base} / \text{massa total do cordão de solda}) \cdot 100\% \quad (2.2)$$

2.7. Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP)

A distância bico de contato-peça possui influência no aquecimento do arame que quanto maior a distância entre o bico de contato e a peça, maior será o aquecimento por efeito Joule e, portanto, menor a corrente necessária para fundir o arame, mantida a velocidade de alimentação. Dentro de certos limites, o aumento do DBCP pode-se usar para aumentar a taxa de deposição. Aumentar a extensão do arame-eletrodo após do bico de contato provoca um aumento no aquecimento do eletrodo por efeito Joule e queda na tensão do arco elétrico, resultando em menor penetração e acréscimo na taxa de deposição [Marques, 2009; Teixeira, 2011].

2.8. Microestrutura da zona fundida das juntas soldadas em aço carbono

De acordo com Giarollo, 2018, a microestrutura da zona fundida é resultado do crescimento epitaxial colunar (o crescimento dos grãos se realiza na mesma orientação cristalina dos grãos parcialmente fundidos) do metal de solda solidificado, sendo influenciada pelo estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, microestrutura e estado de deformações), das condições de aquecimento e resfriamento, bem como do efeito dos elementos de liga. No anexo 1 descreve-se alguns microconstituintes na zona fundida geradas pelo processo de soldagem em aço carbono.

3. METODOLOGIA

A realização deste trabalho foi desenvolvida através da produção de juntas soldadas utilizando chapas de aço SAE 1020 com arames eletrodos com diferentes resistências mecânicas e diferentes gases de proteção utilizando o processo de soldagem MAG.

Desenvolveu-se a preparação dos corpos de prova (CP) para determinar a geometria do cordão de solda a partir da macrografia. Depois foi obtida a micrografia dos corpos de prova para observar a microestrutura e determinar o perfil de dureza de cada seção transversal das soldas.

3.1. Materiais e métodos

3.1.1. Produção das juntas soldadas

O material de aporte (arames eletrodo) utilizado para a produção das juntas soldadas é mostrado na Tab. 3.1. Todos os arames possuíam 1,2 mm de diâmetro.

Tabela 3.1. Composição química dos arames eletrodos em porcentagem de massa [ESAB, 2017; AWS D1.1, 2010].

Arame Eletrodo	Resistência à Tração [MPa]	Composição Química do Arame [%]							
		C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	Mo	Fe
AWS ER70S-6	485	0,08	0,90	1,50	-	-	-	-	bal.
AWS ER80S-G	550	0,10	0,80	1,40	0,80	0,40	-	-	bal.
AWS ER110S-G	750	0,10	0,60	1,50	1,40	-	0,30	0,25	bal.
AWS ER120S-G	827	0,10	0,80	1,90	2,10	0,50	0,40	0,60	bal.

As soldas foram realizadas em chapas aço carbono com espessura de aproximadamente 4,3 mm, e comprimento e largura de 250 mm e 100 mm, respectivamente. Na Tab. 3.2 mostra-se a composição do aço SAE 1020, e na Tab. 3.3, as suas propriedades mecânicas.

Tabela 3.2. Composição química do aço SAE 1020 [TENAX, Acessado em 22/10/2019].

Composição química do aço SAE 1020 [%]			
C	Mn	P máx.	S máx.
0,18-0,23	0,3-0,6	0,03	0,05

Tabela 3.3. Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

Resistência à tração [Mpa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Redução de área [%]	Dureza [HB]	Impacto [J]
450	330	36	59	143	87

As juntas foram produzidas através do processo MAG robotizado, utilizando o robô MA1400/DX100 da Yaskawa Motoman Robotics com uma fonte Fronius TransPuls Synergic 4000 R. Na Tab. 3.4 mostra-se os parâmetros de soldagem dos diferentes CP soldados com o processo MAG. Foram soldadas as juntas com diferentes parâmetros de soldagem procurando otimizar o processo com cada metal de adição. A designação do gás de proteção como C25 faz referência à mistura 75% Argônio e 25% CO₂. Para todos os CP soldados foi utilizada uma mesma velocidade de soldagem de 4,5 mm/s, mesma velocidade de alimentação do arame de 4,5 m/min e um mesmo vazão do gás de 15 L/min. Além disso, as juntas possuíam chanfro reto e a abertura das chapas foi de 1,2 mm para todos os corpos de prova soldados. O valor do rendimento térmico utilizado na soldagem dos CP foi de 0,8.

O modo de transferência metálica utilizada foi curto-circuito. Este modo de transferência deposita na poça do metal base o arame eletrodo fundido por meio de repetidos curtos-circuitos elétricos. É dos modos com baixa tensão e baixa corrente de operação.

Tabela 3.4. Parâmetros das condições de soldagem com o processo MAG para cada CP.

Corpo de Prova (CP)	Corrente [A]	Tensão [V]	Distância do Bico de Contato à Peça [mm]	Arame (AWS ER XX(X)S-G)	Gás de proteção
1	185	20,8	15	70S-6	C25
2	162	23	15	70S-6	100% CO ₂
3	180	20	15	80S-G	100% CO ₂
4	145	20	18	80S-G	100% CO ₂
5	180	19	13	80S-G	100% CO ₂
6	175	22	13	80S-G	100% CO ₂
7	175	22,5	13	110S-G	100% CO ₂
8	175	22	15	110S-G	100% CO ₂
9	180	19,5	15	110S-G	C25
10	175	22	15	120S-G	100% CO ₂
11	182	19,5	15	120S-G	C25

3.1.2. Macrografia, micrografia e dureza da seção transversal dos CP

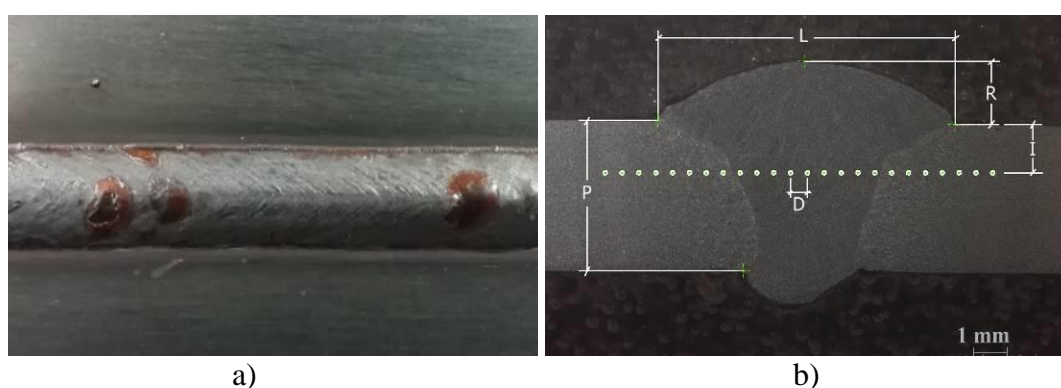
Todos os CP foram cortados no mesmo lugar e transversal ao eixo longitudinal do cordão de solda. O corte foi realizado a 5 cm antes do final do cordão de solda pois nesta localização o cordão tem um comportamento estável.

A preparação da seção transversal do cordão de solda foi feita lixando desde um papel abrasivo de carbetto de silício com granulometria número 100 até 1500 e logo foi feito o polimento com alumina. Após foi realizado o ataque químico com nital 10% para obter as regiões da seção transversal do cordão e posterior macro e micro-análise.

Foram utilizados para determinar a geometria do cordão de solda a lupa LEICA EZ4 HD, para determinar a microestrutura o microscópio óptico ZEISS AXIO Lab.A1 e para determinar o perfil de dureza dos CP o durômetro INSIZE Digital Micro-vickers Hardness Tester do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando carga de 300g e tempo de aplicação de 10s. Para determinar o perfil de dureza da junta, tomou-se 37 indentações desde o MB, passando por a ZAC e pela ZF até de novo a outra região do MB. As indentações foram feitas a 1,5 mm desde a superfície superior da seção transversal do MB como pode ser observado na Fig. 3.1 com dimensão “I”, e com uma distância entre cada indentação de 0,5 mm com dimensão “D”. A indentação número 19 foi feita no centro da região da ZF procurando ter o mesmo número de indentações do lado esquerdo e do lado direito.

Na Fig. 3.1 a) pode-se observar as juntas a topo soldadas. As dimensões “L”, “R” e “P” representam, respectivamente, a largura, reforço e penetração do cordão de solda como pode ser observado na Fig. 3.1 b). Utilizando o software ImageJ, foi possível determinar a geometria do cordão de solda e a diluição, como pode ser observado na Fig. 3.1 b).

Figura 3.1. a) Junta soldada e b) geometria dos cordões de solda e localização das indentações na seção transversal dos CP. L: Largura, R: Reforço, P: Penetração, I: Distância da linha das indentações até superfície superior das chapas do aço e D: Distância entre cada indentação dos cordões de solda.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação da qualidade da superfície do cordão e macrografia dos CP

Na Tab. 4.1 apresenta-se os parâmetros das geometrias do cordão de solda e determinou-se a diluição. A diluição dos CP estabeleceram-se em uma faixa de 51,4%-69,7% o que representa o percentagem de metal base na constituição da zona fundida. Além disso, dos CP 3 ao 11 a penetração das soldas foi total.

As espessuras das chapas de aço SAE 1020 estão dentro da faixa 4,1-4,5 mm, portanto estabeleceu-se uma meia da espessura das chapas como 4,3 mm para mostrar o perfil da penetração como pode ser observado na Fig. 4.2 c).

Tabela 4.1. Geometria do cordão de solda e diluição calculada para cada CP.

Parâmetro	Corpo de prova										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Largura [mm]	10,3	8,0	7,6	8,3	7,3	9,6	8,3	9,5	9,0	9,8	8,7
Reforço [mm]	2,3	1,9	1,6	2,0	2,2	1,5	1,2	1,4	1,8	1,4	1,7
Penetração [mm]	3,5	3,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Área penetrada (Ap) [mm ²]	16,1	15,8	18,4	16,3	19,2	22,4	24,9	21,9	17,4	22,2	18,3
Área depositada (Ad)[mm ²]	15,2	9,5	9,9	11,1	9,8	11,5	10,8	12,2	12,3	10,2	12,5
Diluição [%]	51,4	62,6	65,0	59,5	66,1	66,1	69,7	64,2	58,6	68,5	59,5
Energia de soldagem [kJ/cm]	6,8	6,6	6,4	5,2	6,1	6,8	7,0	6,8	6,2	6,8	6,3

Na Fig. 4.1 observa-se o efeito dos parâmetros de soldagem e do gás de proteção na qualidade da superfície das soldas (outros cordões podem ser observados no Apêndice A). Para os três CP soldados com o gás C25 a qualidade de soldagem resultou similar como mostra a Fig. 4.1 a), com pouca geração de salpico e um cordão com boa qualidade superficial visual para os parâmetros e arame consumível empregados. A pouca geração de salpicos e o perfil ótimo é devido ao efeito do Ar na estabilidade do arco comparado com CO₂ puro. Na Fig. 4.1 b) observa-se a qualidade superficial para o CP 2 que foi soldado com arame AWS ER70S-6 e CO₂ puro. Pode-se observar que a qualidade da superfície é baixa comparada com o gás C25 empregado. Resultou elevado o nível de salpico e pouca homogeneidade na largura e no reforço ao longo do cordão. Além disso, só foi possível realizar 3 testes de soldagem para otimizar o processo até conseguir o resultado com os parâmetros e gás empregados no CP 2. O anterior devido ao pouco tempo para a soldagem do CP 2 porque os CP 1 e 2 foram as últimas juntas em se realizar portanto não teve tempo de fazer mais de 3 testes para ter uma junta otimizada. De acordo com este resultado, os parâmetros e gás empregados na soldagem da junta do CP 2, não tem condições ótimas para seu emprego na soldagem de processos industriais devido à sua instabilidade no processo apesar do seu maior emprego na indústria. Na Fig. 4.1 c) pode-se observar uma maior qualidade do cordão de solda comparado com o anterior soldado com CO₂ puro. Para obter o cordão foi empregado arame AWS ER110S-G e CO₂ puro com os parâmetros de soldagem da Tab. 3.4. Para os parâmetros empregados resultou num cordão de maior homogeneidade na largura e no reforço do cordão e com baixo nível de salpico. Também pode-se observar que foram necessários poucos testes de soldagem para otimizar o processo e gerar o cordão de solda com a qualidade obtida.

O resultado de soldar com arame AWS ER80S-G e gás de proteção 100% CO₂ mostra-se na Fig. A1 do Apêndice A onde observa-se uma menor qualidade na superfície do cordão de solda comparado com os cordões obtidos com arame de maior resistência mecânica e CO₂ puro empregados na soldagem. Nos CP 3, 4, 5 e 6, foi observado que precisaram de maior número de soldagens com diferentes parâmetros para otimizar o processo e obter um cordão de solda de boa qualidade superficial comparado com o número de testes realizados para a soldagem com arame AWS ER110S-G e AWS ER120S-G. Observa-se que o CP 4 da Fig. A1 d) com os parâmetros de soldagem e CO₂ puro empregados, não pode ser aceitado devido à sua baixa qualidade superficial, alto nível de salpico e baixa homogeneidade na largura e reforço ao longo do cordão. Para os CP soldados com arame AWS ER110S-G e AWS

ER120S-G e 100% CO₂, observa-se boa qualidade superficial do cordão. De acordo com isto, os parâmetros e CO₂ puro empregados para estas soldas com arame de alta resistência foram ótimos.

No Apêndice A1 pode-se observar a qualidade superficial de todos os corpos de prova soldados.

Figura 4.1. Qualidade da superfície das juntas soldadas nos CP a) 1, b) 2 e c) 8.



De acordo com a Tab. 3.4, dos parâmetros de soldagem empregados para o arame AWS ER70S-6, na Fig. 4.2 a) observa-se que a energia de soldagem foi maior no CP 1 que no 2. Isto devido aos parâmetros de tensão e corrente empregados com velocidade de soldagem fixa para os CP. Observa-se na Fig. 4.2 c) que a largura foi maior no CP 1 que no 2, embora o valor da tensão no CP 2 foi maior. O valor da largura menor do CP 2 resultou devido à instabilidade do arco que gerou maior nível de salpico e menor qualidade do cordão de solda, além do uso de dióxido de carbono puro que favorece o aumento das condições de maior salpico e baixa instabilidade do arco comparado com mistura Ar e CO₂. Embora, dos resultados obtidos e os parâmetros empregados, não foi suficiente a energia de soldagem para obter um cordão com penetração total e, apesar da maior energia de soldagem no CP 1, na Fig. 4.2 b) pode-se observar que a diluição foi maior no CP 2 em um pouco mais de 10 unidades percentuais. Isto é causado pelo fato do uso do Ar misturado com CO₂ pois o Ar produz cordões com maior penetração no centro que nas bordas enquanto com o uso de CO₂ puro a penetração é mais profunda nas bordas e no centro pela maior condutividade térmica do CO₂ comparado com o Ar. Esta condição de falta de penetração do cordão nos CP 1 e 2 pode gerar pontos de concentração de tensões e possíveis pontos de corrosão ou oxidação da junta em uma operação sob agentes atmosféricos ou químicos que podem afetar negativamente as condições mecânicas e de serviço se o desenho da junta foi com penetração total.

Na Fig. 4.3 a), observa-se a macrografia do CP 1 onde pode-se apreciar a falta de penetração e a geometria do cordão devido ao uso de Ar misturado com CO₂. De outro jeito, não contém descontinuidades visíveis o cordão.

De acordo à qualidade superficial do CP 2, não recomenda-se seu uso com gás de proteção CO₂ puro e os parâmetros de soldagem empregados pois estas condições geram cordões de baixa qualidade superficial e pode acrescentar os custos de soldagem pelas perdas devido ao salpico.

Pelos parâmetros de soldagem empregados e o gás de proteção utilizado na solda do CP 1, se se quer uma penetração total da junta, é preciso fazer um chanfro adequado para garantir a totalidade da penetração. Esta junta do CP 1 tem uma qualidade superficial ótima e não apresenta descontinuidades diferentes à falta de penetração que podam afetar seu comportamento mecânico.

Os resultados obtidos com o uso do arame AWS ER80S-G mostram, e de acordo aos parâmetros de soldagem e o CO₂ puro como gás de proteção empregados para os CP 3, 4, 5 e 6, que a penetração do cordão de solda foi total como pode ser observado na Fig. 4.2 c), enquanto a energia de soldagem foi de maior valor no CP 6 e de menor valor no CP 4 de

acordo à Fig. 4.2 a). A diluição mostrada na Fig. 4.2 b) apresenta uma tendência proporcional à quantidade de energia de soldagem entregue pois o menor valor de energia entregue ao CP 4 representou a menor diluição do mesmo CP e a maior energia de soldagem entregue ao CP 6, representou uns dos maiores valores de diluição dos quatro CP soldados com o mesmo arame e gás. Este fato é devido ao uso do mesmo gás de proteção que faz cordões profundos no centro e nas bordas portanto a proporcionalidade pode ser conservada.

Figura 4.2. a) Energia de soldagem, b) diluição das soldas e c) representação gráfica da largura, penetração e reforço da solda dos corpos de prova.

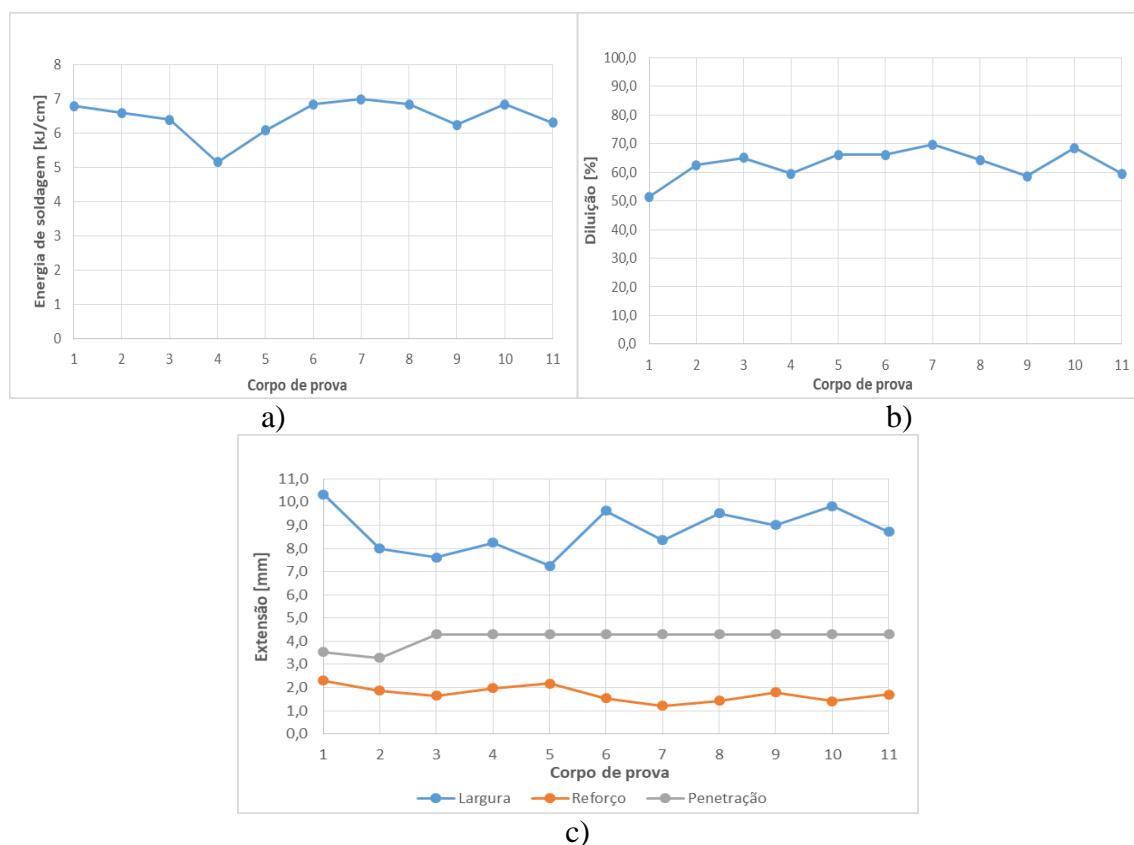
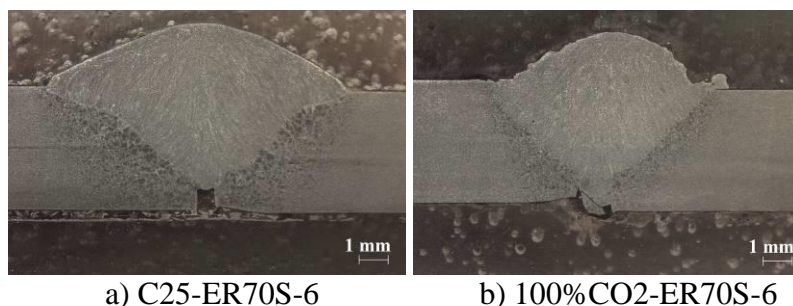


Figura 4.3. Macrografia da seção transversal do CP a) 1 e b) 2.



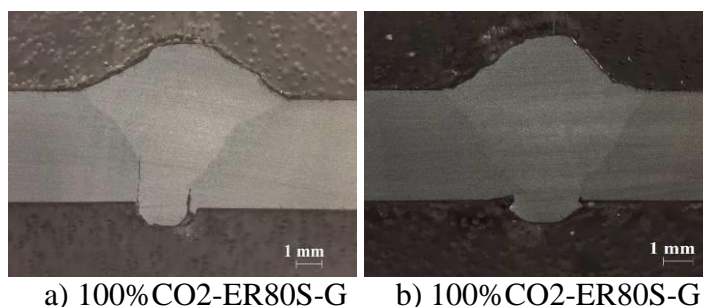
Na Fig. 4.4 a) e b) mostra-se as macrografias dos CP 4 e 5 que apresentaram maiores discontinuidades comparado com os outros CP 3 e 6. Pode-se apreciar que na Fig. 4.4 a) tem falta de fusão nos lados da zona fundida começando da raiz e prolongando-se pela linha de fusão. Esta falta de fusão foi causada pela baixa quantidade de energia de soldagem entregue

à junta. Por causa da baixa energia de soldagem entregue ao CP 4, o aquecimento da junta não foi adequado e é gerada a falta de fusão. Portanto, os parâmetros empregados para esta junta não são adequados por sua condição de falta de fusão prejudicial para seu comportamento mecânico e gerador de concentrador de tensões.

Na Fig. 4.4 b) mostra-se a descontinuidade de mordedura na raiz da junta produzida por uma alta energia de soldagem para as condições de tensão, corrente e DBCP empregados na junta.

Observando o comportamento dos CP 3 e 4 e, de acordo à Fig. 4.2 c), o efeito do aumento no DBCP causa maior taxa de deposição do arame devido ao aquecimento por efeito Joule o que faz à junta atingir maiores valores de reforço e largura do cordão de solda. Apesar do que o CP 3 tem maior corrente, o valor do reforço foi menor que o CP 4. Além disso, os valores de tensão são os mesmos mas o CP 4 apresentou maior largura do cordão comparado com o CP 3. Enquanto, para os CP 5 e 6, se o DBCP permanece fixo e variam os valores de tensão e corrente, o resultado é proporcional aos valores fornecidos pela fonte devido a que com maior valor da tensão tem-se maior largura do cordão o que pode ser observado no CP 6 e com menor valor de corrente tem-se um reforço mais baixo como pode ser observado no mesmo CP 6 na Fig. 4.2 c).

Figura 4.4. Macrografia da seção transversal do CP a) 4 e b) 5.



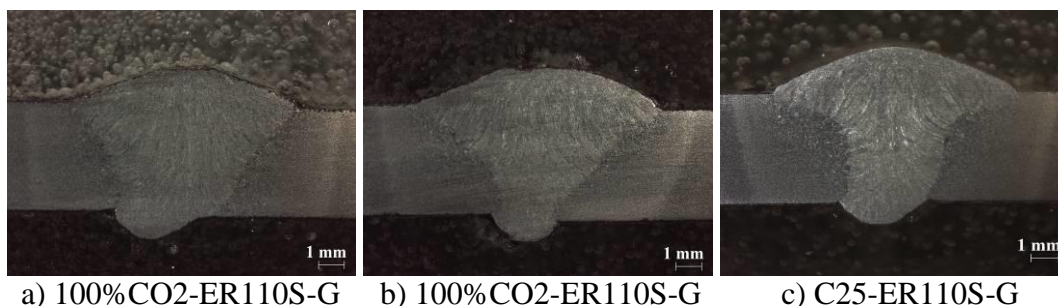
Com as condições dadas, o maior gerador de salpico foi o CP 4 como pode ser observado na Fig. A1 d) do Apêndice A. Portanto, os parâmetros empregados com o gás de proteção CO₂ puro não resultam em uma boa qualidade superficial do cordão de solda e pode acrescentar os custos dos processos e afetar a resistência mecânica da junta.

Observando os resultados obtidos com as juntas soldadas com arame AWS ER110S-G pode-se concluir que a penetração foi total nos três CP 7, 8 e 9 como mostra a Fig. 4.5. Pode-se apreciar o efeito do gás C25 na geometria do cordão no qual tem maior penetração no centro que nas bordas comparado com o uso do gás CO₂ puro que tem maior penetração nas bordas. Este fato faz com que a diluição da junta soldada com gás C25 seja menor que os outros CP soldados com 100% CO₂. Além disso, observa-se uma proporcionalidade entre a energia de soldagem e a diluição nos CP 7 e 8, enquanto a diluição do CP 9 é baixa comparada com os outros CP 7 e 8 devido ao uso de gás C25 como pode ser observado na Fig. 4.2 a) e b).

Para os parâmetros e o gás de proteção CO₂ puro empregados nos CP 7 e 8, pode-se observar que se mantiver a corrente fixa para os dois e incrementa-se o valor do DBCP, o efeito é maior largura e maior reforço devido ao maior aquecimento do arame por efeito Joule produzindo maior taxa de deposição como pode ser observado na Fig. 4.2 c) no qual o CP 8 tem maiores valores de largura e reforço apesar de ter menor tensão pois este último parâmetro se for maior produz maiores larguras do cordão.

Visualmente não tem presença de descontinuidades e a melhor qualidade superficial foi obtida com o uso do gás C25 para o CP 9 com baixo nível de respingo enquanto o maior nível de respingo foi obtido para o CP 7 que foi soldado com CO₂ puro.

Figura 4.5. Macrografia da seção transversal dos CP a) 7, b) 8 e c) 9.



De acordo com a Fig. 4.2 a) e b) pode-se observar que o CP 10 teve maior energia de soldagem e portanto maior diluição entre os dois CP 10 e 11. Além disso, o efeito do uso do gás de proteção C25 contribuiu na geração do menor valor da diluição do CP 11. A penetração foi total nas duas juntas.

Na Fig. A2 do Apêndice A apresenta-se as macrografias de todos os CP.

4.2. Avaliação da micrografia e dureza das juntas soldadas

Na Fig. 4.6 pode-se observar as micrografias representativas dos cordões de solda obtidos com os diferentes arames consumíveis empregados. Na Fig. 4.6 a) observa-se no cordão soldado com arame AWS ER70S-6 a presença de microconstituintes como ferrita acicular (FA), ferrita poligonal intragranular (PF(I)), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)). Na Fig. 4.6 b) observa-se a presença dos mesmos constituintes anteriores. A diferença é no tamanho de grão nos microconstituintes já que com o aumento da resistência mecânica do arame, a quantidade da ferrita de contorno de grão diminui junto com a quantidade da ferrita de segunda fase alinhada enquanto aumenta a quantidade da ferrita acicular.

De acordo com Giarollo, 2018, a microestrutura do metal de solda está influenciada pela composição química do metal de adição e do metal base, diluição e a energia fornecida ao processo. Além disso, o efeito do manganês na faixa de 0,6%-1,8% produz uma diminuição de ferrita intergranular, aumento da quantidade da ferrita acicular e refinamento desta última. O mesmo que com o manganês, o aumento do níquel produz uma diminuição da temperatura de transformação da austenita em ferrita o que resulta em um regime de crescimento mais favorável para a ferrita acicular. Com o anterior, pode-se observar na Fig. 4.6 d) o refino de ferrita acicular assim como a diminuição da quantidade de ferrita de contorno de grão, ferrita poligonal intragranular e ferrita de segunda fase alinhada. Isto devido ao maior percentagem de elementos químicos como manganês e níquel no arame.

Na Fig. 4.7 observa-se que com o aumento na resistência mecânica do arame, acrescenta-se o valor de dureza na ZF representada pelos pontos amarelos. O anterior devido as características referidas ao quadro de texto passado do refinamento da ferrita acicular e aumento na quantidade da mesma, além de diminuir a quantidade de ferrita de contorno de grão, ferrita poligonal intragranular e ferrita de segunda fase alinhada.

De acordo com a Fig. 4.7 c) observa-se que a dureza nos pontos 14, 15 e 25, próximos à linha de fusão, têm uma dureza similar à ZAC. Isto devido ao efeito da diluição do metal base que faz que o valor da dureza seja similar as propriedades desta zona próxima à ZAC. O

mesmo ocorre com o ponto 23 do perfil de dureza da Fig. 4.7 d) e os pontos 24 e 25 da Fig. 4.7 b).

Nas Fig. A3 e A4 do Apêndice A pode-se observar a microestrutura e os perfis de dureza de todos os CP.

Figura 4.6. Identificação dos microconstituintes nos CP a) 1, b) 3, c) 9 e d) 10.

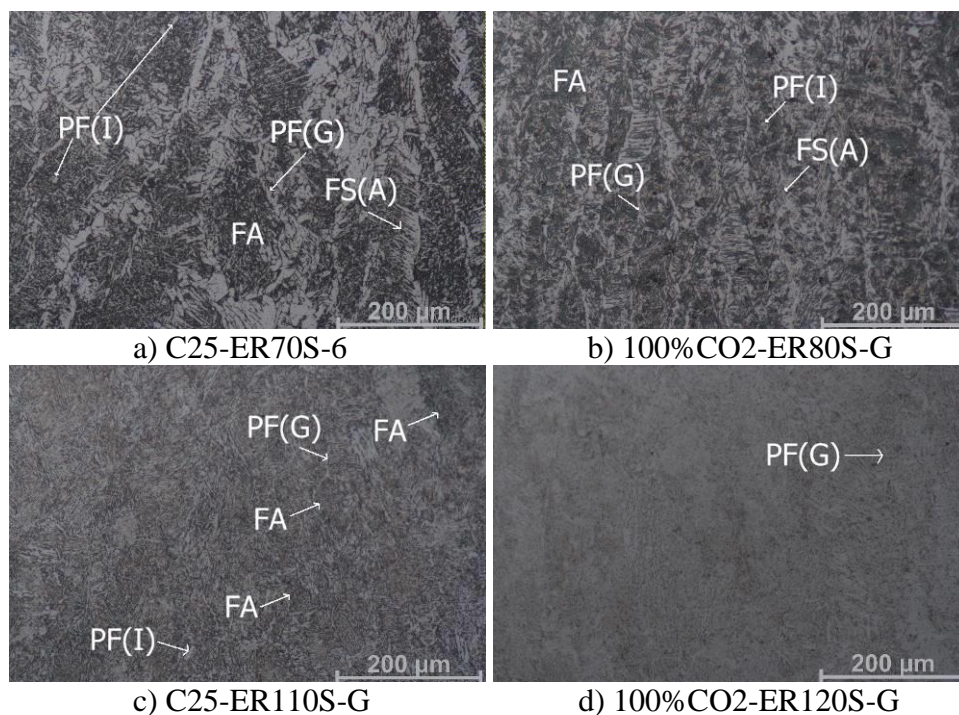
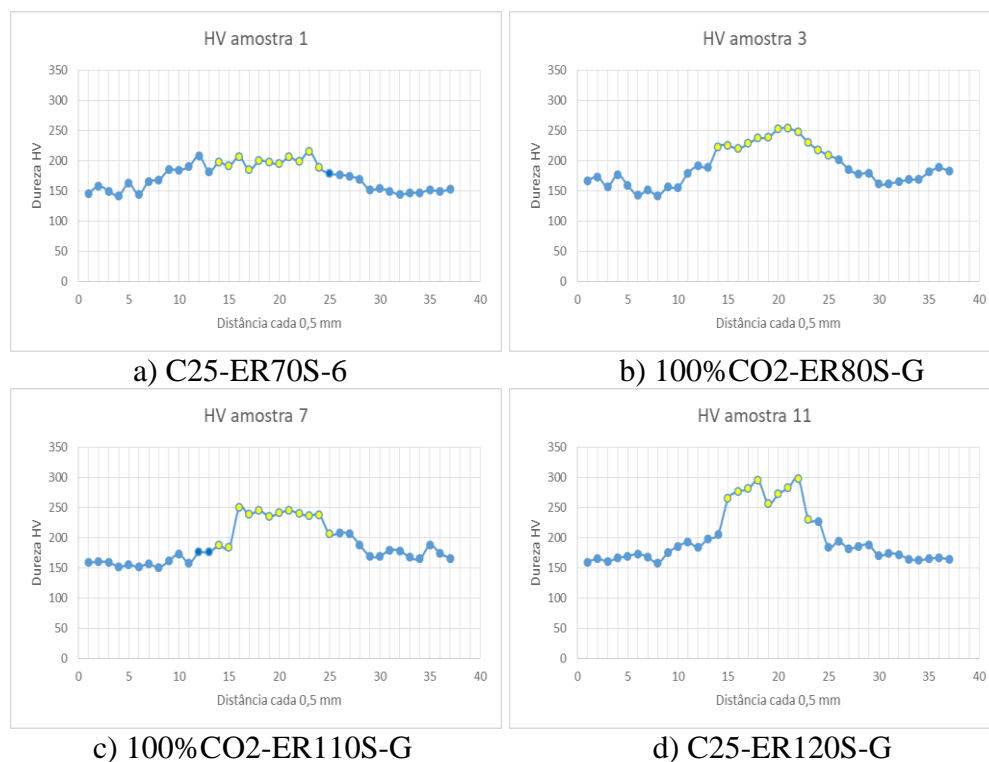


Figura 4.7. Perfil de dureza dos CP a) 1, b) 3, c) 7 e d) 11.



5. CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo deste trabalho pode-se concluir o seguinte:

Com arames de maior resistência mecânica e soldados com 100% CO₂ foram obtidos cordões de melhor qualidade superficial que com arames de menor resistência mecânica como o AWS ER70S-6 na soldagem de aços SAE 1020.

Os parâmetros de soldagem (T=23 v; C=162 A), gás de proteção (100% CO₂) e arame eletrodo (AWS ER70S-6) empregados na soldagem do CP 2, apesar de ser os mais ótimos depois de três testes de soldagem com o mesmo metal de adição, o processo de soldagem resultou muito instável e a qualidade do cordão de solda resultou muito baixa com alto nível de respingo, penetração parcial e pouca homogeneidade na largura e no reforço. Portanto, para as condições de soldagem descritas e o metal de adição empregado, a junta soldada não é aceitável.

A soldagem do CP 4 não é aceitável devido ao seu alto nível de salpico, pouca homogeneidade na largura e no reforço do cordão e presença de descontinuidade tipo falta de fusão. De acordo com o anterior, os parâmetros de soldagem e o gás de proteção empregados para o processo e o arame não são os adequados para este tipo de aços SAE 1020.

Foi possível observar o efeito do gás de proteção na soldagem de aços SAE 1020. O emprego de 100% CO₂ produz cordões com maior penetração e uma geometria arredondada mas com presença de alto nível de salpico se os parâmetros de soldagem não são os otimizados. Enquanto a misturas de Ar com CO₂ observou-se um cordão com maior penetração no centro que nas bordas mas pouca geração de salpico.

O emprego de Ar na mistura com CO₂ na quantidade de 75%-25%, respectivamente, produz cordões de solda com menor valor de diluição comparado com o emprego de 100% CO₂ provavelmente devido à menor condutividade térmica do Ar na soldagem de aços SAE 1020.

Observa-se a influência que tem os arames de maior resistência mecânica à tração nos resultados da microestrutura da ZF pois arames com maior valor de resistência apresentam uma diminuição na quantidade de microconstituintes como ferrita poligonal intragranular, ferrita de contorno de grão e ferrita de segunda fase alinhada enquanto aumenta a quantidade de ferrita acicular e acrescenta-se o refinamento desta última na soldagem de aços SAE 1020. A percentagem de manganês e níquel na composição química do arame eletrodo provavelmente tem influência na formação destes microconstituintes quanto à diminuição de uns e aumento e refinamento de outros.

Com o refinamento e com o aumento na quantidade da ferrita acicular na microestrutura da ZF nos aços SAE 1020 soldados com os parâmetros de soldagem e o gás de proteção neste trabalho, observa-se o aumento da dureza do metal de solda com o emprego de arames de maior resistência mecânica e composição de elementos químicos como manganês e níquel.

6. TRABALHOS FUTUROS

Realizar em chapas de aços SAE 1020, com os mesmos parâmetros de soldagem e gases de proteção, vários cortes transversais cada certa longitude ao longo do cordão para avaliar a micrografia, dureza e geometria de cada seção transversal obtida.

Avaliar os custos de soldagem de chapas de aço SAE 1020 com arames de baixa e alta resistência mecânica e com os parâmetros de soldagem e gases de proteção empregados neste trabalho.

Avaliar a geração de escória de chapas de aço SAE 1020 com os parâmetros empregados neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alba, D. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS SOBRE A GEOMETRIA DOS CORDÕES PRODUZIDOS POR SOLDAGEM MAG ROBOTIZADA**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Alves, V. **DESENVOLVIMENTO DE ENVELOPES OPERACIONAIS PARA PROCESSO MIG/MAG ROBOTIZADO COM DIFERENTES GASES DE PROTEÇÃO**, Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ASM HANDBOOK. **VOLUME 1 Properties and Selection: Irons Steels and High-Performance Alloys**, ASM INTERNATIONAL, 1990.

AWS, American Welding Society. **Welding Handbook – Welding Processes**, part 1. Welding Handbook Committee, vol. 2, ed. 9, USA, Miami, 2004.

Avner, S. **Introducción a la metalúrgia física**, McGraw-Hill, 2^{da} edición, 1988.

Bhadeshia, H. K. D. H. **Bainite in steel transformation, microstructure and properties**, The Press University, Cambridge, 2 edition, 2001.

Dias, F. **CARACTERIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA DE AÇO SAE 1020 COM TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

ESAB. **Catalogo de consumíveis**, disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf>, Acesso em: 08 dez. 2017.

Farrar, R. A. and Harrison, P. L. Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: na overview, **Journal of Material Science**, vol. 22(11), p. 3812-3820, 1987.

Giarollo, D. **INFLUÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO NA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE DOIS AÇOS ESTRUTURAIS**, Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

IIW. **Sub-Comission IXJ Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals**, IIW Doc. IX-1533-88, 1998.

Machado, I. **SOLDAGEM & TÉCNICAS CONEXAS: PROCESSOS**, Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477 p.

Marques, P. Et al. **SOLDAGEM. FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA**, 3^a edição atualizada, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363 p.

Modenesi, P. J. **SOLDABILIDADE DOS AÇOS TRANSFORMÁVEIS**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

Moreira, A. **INFLUÊNCIA DA ATMOSFERA PROTETORA NO CORDÃO DE SOLDA OBTIDO ATRAVÉS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW E FCAW**, Tese de mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2008.

Pontel, H. **ESTUDO DO DESGASTE ABRASIVO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO HARDOX 500 SOLDADO POR MAG CONVENCIONAL**, Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

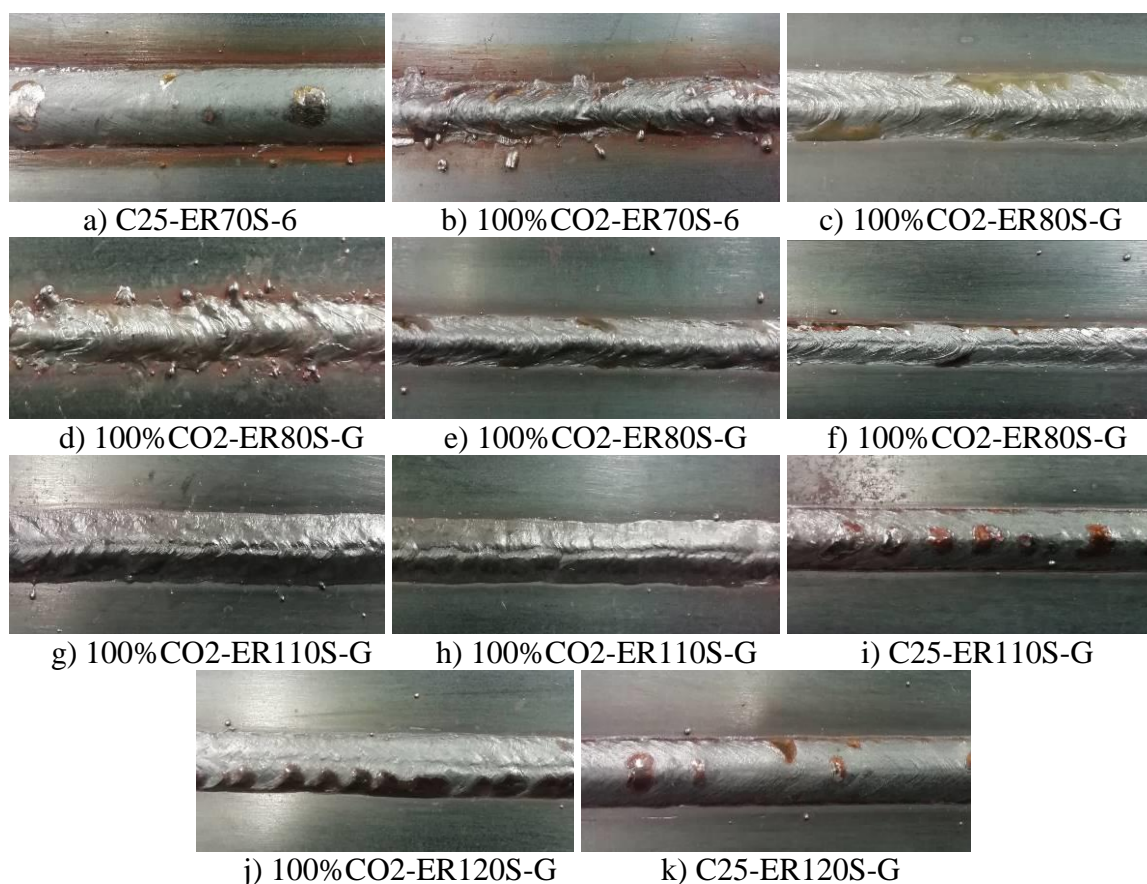
Teixeira, G. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA DEPOSITADO PELO PROCESSO DE SOLDAGEM TIG-MAG EM TANDEM**, Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TENAX. **Chapas/SAE 1020**, <https://www.tenax.com.br/tenax/produtos/chapas-e-placas-de-aco/sae-1020/>. Acessado em 22/10/2019.

A. APÊNDICE

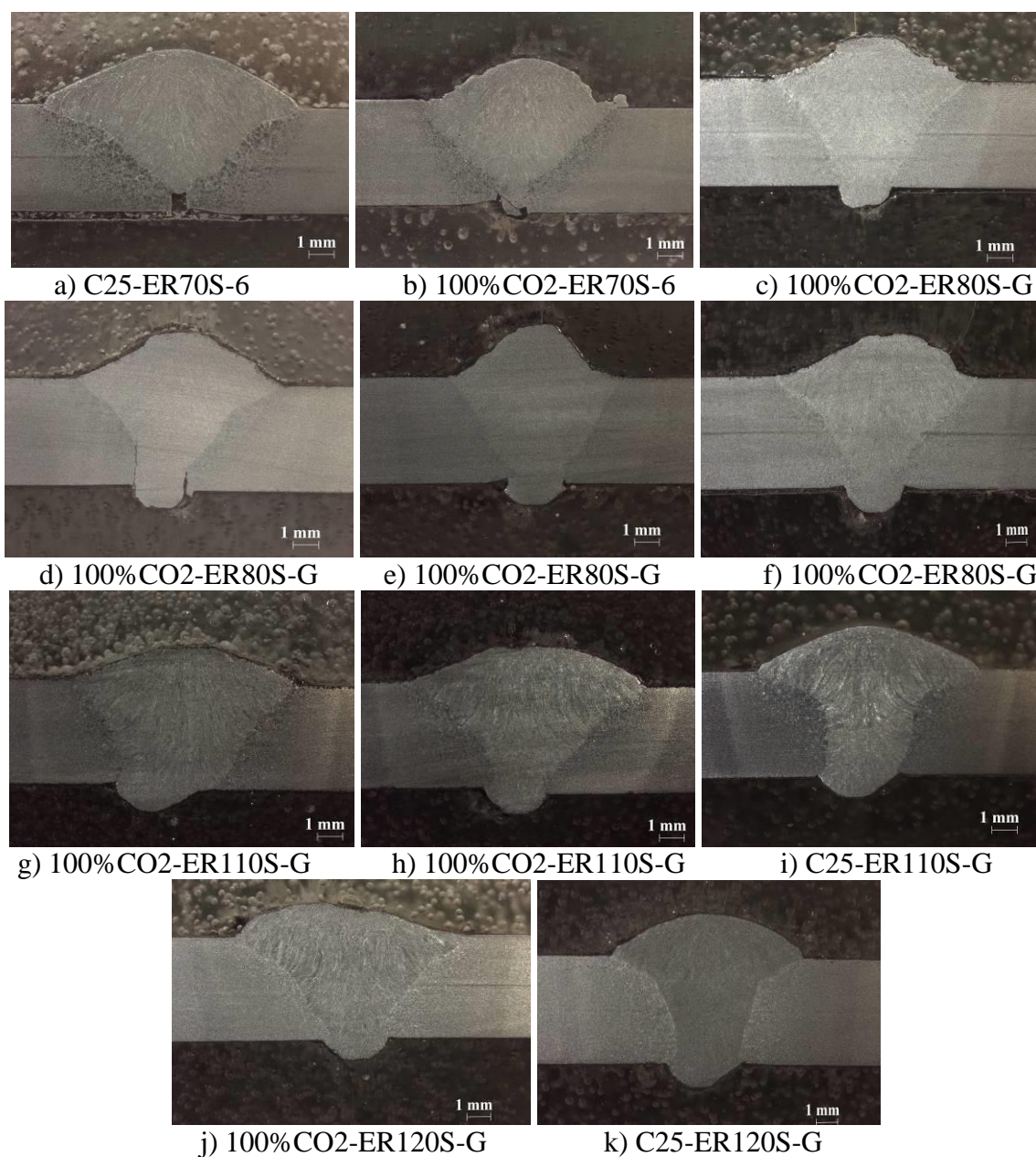
Na Fig. A1 mostra-se a qualidade da superfície dos CP.

Figura A1. Cordão de solda dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11.



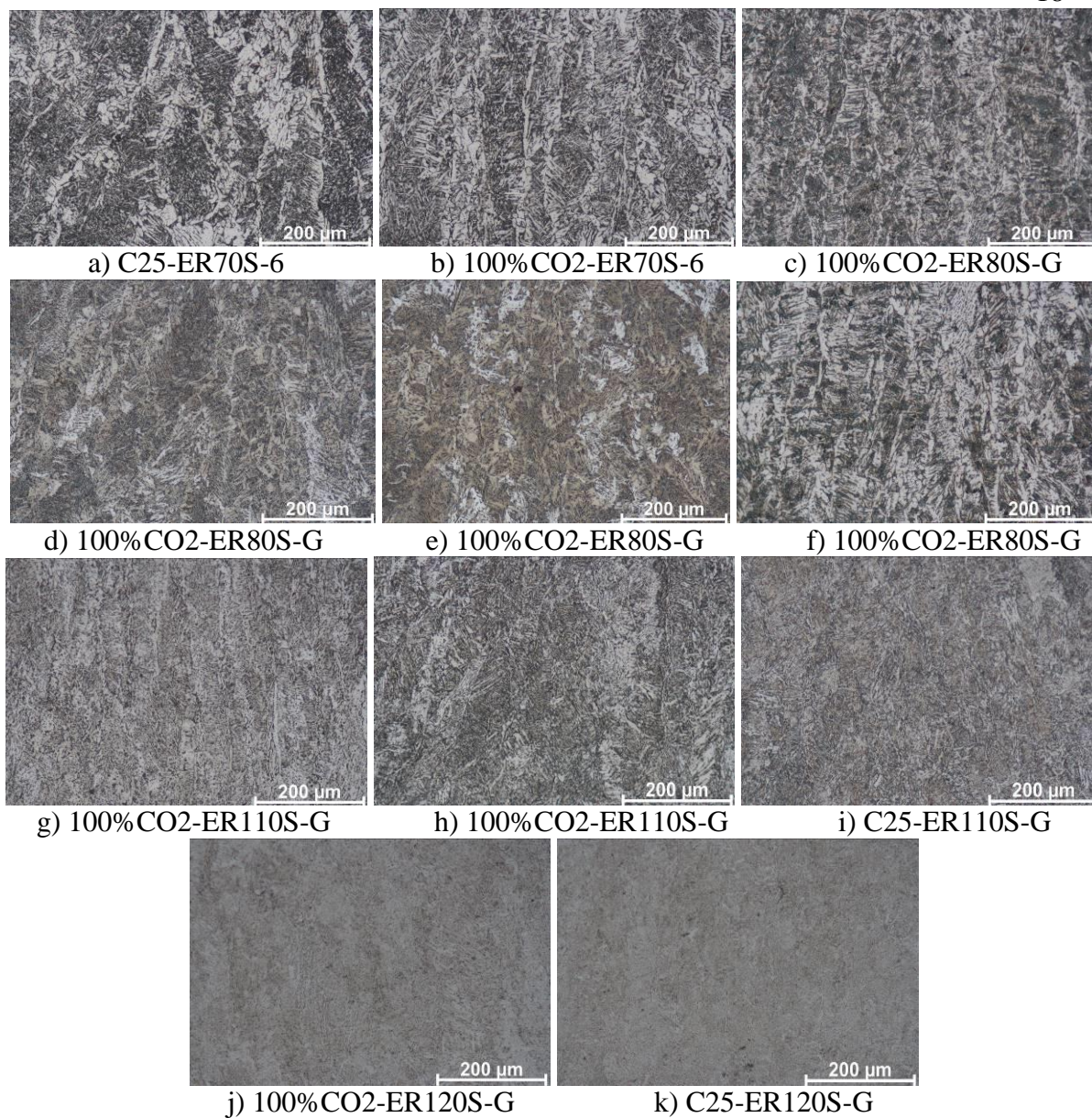
Na Fig. A2 mostra-se a geometria dos CP observados com lupa 8x.

Figura A2. Macrografia das juntas soldadas dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11 obtidas com lente de 8x.



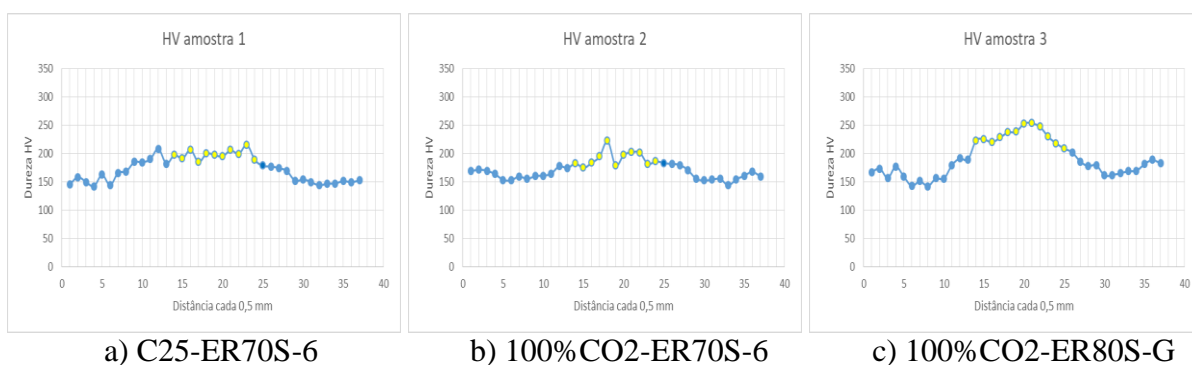
Na Fig. A3 mostra-se a microestrutura dos CP observados com microscópio óptico e 200x.

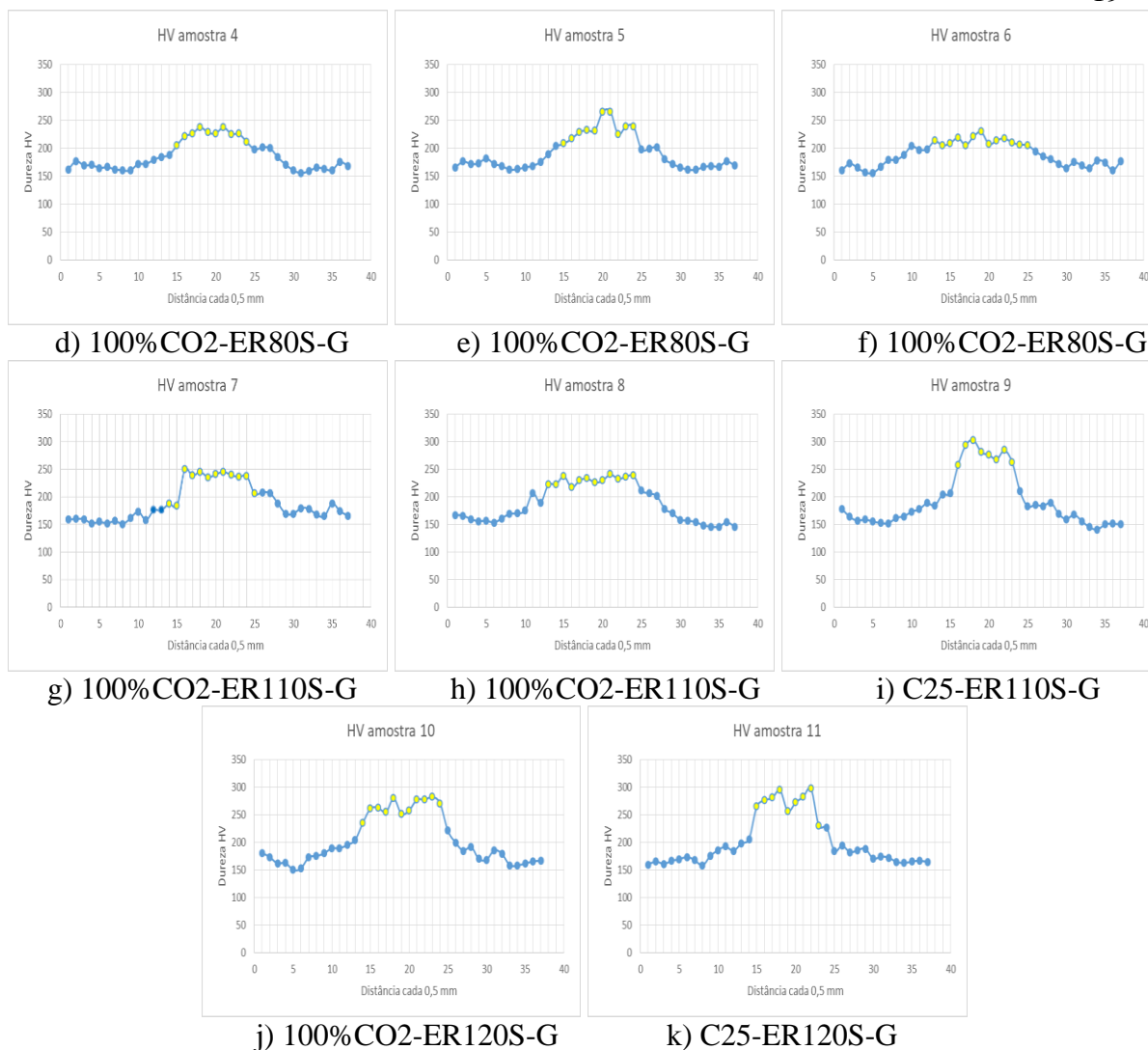
Figura A3. Micrografia dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11.



Na Fig. A4 mostra-se os perfis de micro dureza da seção transversal dos CP.

Figura A4. Perfis de dureza das juntas soldadas dos CP a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6, g) 7, h) 8, i) 9, j) 10 e k) 11.





ANEXO 1

De acordo com Giarollo, 2018, Instituto Internacional de Soldagem (IIW), 1988, Modenesi, 2002, os constituintes mais comuns da zona fundida podem ser classificados como segue:

- “Ferrita de contorno de grãos – PF(G): É o primeiro constituinte que se forma pela decomposição da austenita, nucleia-se nos contornos de grão austeníticos.”
- “Ferrita poligonal intragranular – PF(I): Se a austenita apresentar um tamanho de grão muito maior que a ferrita que está sendo formada nos seus contornos de grão e houver sítios para nucleação intragranular, grãos de ferrita podem nuclear no interior da austenita.”
- “Ferrita com segunda fase alinhada – FS(A): Uma forma de ferrita próeutetóide que se forma a temperatura mais baixas que os constituintes discutidos anteriormente e se constitui de placas que nucleiam nos contornos da austenita e crescem ao longo de planos bem definidos dentro destes grãos. Este constituinte pode iniciar o seu crescimento diretamente do contorno de grão da austenita ou a partir de grãos de ferrita de contorno de grãos formados anteriormente.”
- “Ferrita acicular – FA: Consiste em arranjos de placas de ferrita em diferentes direções. A ferrita acicular forma-se intergranularmente, nucleando-se de forma heterogênea em sítios como inclusões, precipitados e irregularidades nos grãos austeníticos.”