CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO PELO PROCESSO HÍBRIDO LASER–GMAW

Fernando Antonio Corrêa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.
Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Rio de Janeiro
Novembro / 2017

PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO PELO PROCESSO HÍBRIDO LASER–GMAW

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Fernando Antonio Corrêa

Aprovador por:

Presidente, Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc. (Orientador)

Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc. (Coorientador)

Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

Valter Rocha dos Santos, D.Sc. (PUC-Rio)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C824 Corrêa, Fernando Antonio
Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de aço carbono pelo processo híbrido LASER-GMAW / Fernando Antonio Corrêa.—2017.
73f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 68-73
Orientadores : Luis Felipe Guimarães de Souza
Jorge Carlos Ferreira Jorge

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas (Engenharia). 3. Aço-carbono. 4. Aço carbono – Propriedades mecânicas. 5. Soldagem . I. Souza, Luis Felipe Guimarães de (Orient.). II. Jorge, Jorge Carlos Ferreira (Orient.). III. Título.

CDD 620.11292

Dedico aos meus pais, em especial a minha mãe, Maria Bernardete, que sempre me incentivou na busca dos meus objetivos pessoais e profissionais e no aperfeiçoamento de meus conhecimentos, a minha amada esposa Fernanda Salomão pelo apoio incondicional e aos meus filhos Rodrigo Corrêa e Rafael Corrêa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela permissão concedida para concluir mais este desafio, sendo uma importante etapa na minha vida.

A minha mãe, Maria Bernardete Santana Corrêa, pela sua incansável luta e incentivo em prol da minha formação profissional e acadêmica;

A minha esposa Maria Fernanda Nalin Salomão, por estar ao meu lado com amor, incentivo e companheirismo;

Aos meus filhos, Rafael Veras Corrêa e Rodrigo Salomão Corrêa, que me inspiram a querer ser mais que fui até hoje;

Aos Professores Jorge Carlos Ferreira Jorge (D.Sc.) e Luis Felipe Guimarães de Souza (D.Sc.), pelos ensinamentos, orientação, atenção e disponibilidade em todos os momentos que foram necessários para a conclusão deste trabalho;

Ao amigo Jeferson Frederico Monteiro Costa (M.Sc), por compartilhar todo conhecimento, experiência, atenção e muita disponibilidade, valores estes inestimáveis, que foram fundamentais desde a preparação até finalização deste trabalho;

Ao CEFET/RJ pela infraestrutura dos seus Laboratórios usada na realização dos ensaios mecânicos, microscopia ótica e eletrônica de varredura;

Ao Laboratório MTC, pela importante contribuição na preparação dos corpos de prova, com corte, usinagem, ensaios mecânicos e disponibilidade dos seus profissionais;

Aos profissionais e amigos do Setor de Serviços Tecnológicos do IST Solda, pelo incentivo em realizar o mestrado e também suas importantes contribuições que me ajudaram na realização deste trabalho;

Ao Sistema FIRJAN, através do Instituto SENAI de Tecnologia – Solda, por disponibilizar sua infraestrutura e suporte técnico dos Laboratórios de Soldagem, Ensaios Mecânicos, Ensaios não Destrutíveis e Microscopia, durante todas as etapas do mestrado até a conclusão deste trabalho.

“Toda História é importante, mas a História da Tecnologia é a área mais relevante.”

5ª Lei de Melvin Kranzberg.

RESUMO

PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO PELO PROCESSO HÍBRIDO LASER–GMAW

O processo de soldagem híbrido LASER- GMAW, comumente designado por HLAW (Hybrid Laser Arc Welding), foi concebido há bastante tempo, mas só recentemente começou a ser aplicado industrialmente. Nesse trabalho foi feita uma avaliação do seu desempenho na soldagem de chapas de aço C-Mn com 10mm de espessura. As juntas produzidas foram avaliadas por meio de ensaios de impacto Charpy-V e mapeamento de microdureza Vickers, além da caracterização microestrutural. Também foram realizadas, medições dos níveis das tensões residuais introduzidas na junta soldada pelo processo híbrido, comparativamente com o processo GMAW. Os resultados da avaliação de desempenho do processo híbrido mostraram maior produtividade em relação ao GMAW. As propriedades mecânicas da junta soldada mostraram-se compatíveis com os requisitos do material de base.

Palavras-chave: Soldagem Híbrida; MIG-Laser; Aço C-Mn

ABSTRACT

MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINT OBTAINED BY HYBRID LASER–GMAW PROCESS

Hybrid Laser-GMAW process, generally known as HLAW (Hybrid Laser Arc Welding), was developed many years ago, but only recently started to be used in industrial applications. In this work, it has been done an evaluation of its process performance when welding a 10mm thick plate of a C-Mn Steel, as well as, the determination of mechanical properties and metallurgical structure of the welded joint, using impact and hardness tests and microstructural characterization. Residual stress was also measured in the plate welded with hybrid process, comparatively to a welded joint performed with GMAW process. The results of performance evaluation of hybrid process showed that it has higher productivity when compared to GMAW. The mechanical properties of the hybrid welded joint were in accordance with base metal requirements.

Keywords: Hybrid Welding; HLAW; C-Mn Steel.

SUMÁRIO

Introdução 15
Capítulo 1 - Revisão Bibliográfica 17
1.1 - O Processo de Soldagem Híbrido LASER-GMAW 17
1.1.1 - Histórico do Processo de Soldagem Híbrido LASER– GMAW 17
1.1.2 – Fundamentos do Processo de Soldagem HLAW-GMAW 20
1.1.3 – Parâmetros de Soldagem do Processo HLAW-GMAW 25
1.1.4 – Aspectos Térmicos na Soldagem com o Processo HLAW-GMAW 30
Capítulo 2 – Materiais e Métodos 36
2.1 – Materiais 36
2.1.1. - Corpos de Prova 36
2.2. - Gás de Proteção 38
2.3. - Soldagem 38
2.3.1. Processo GMAW 38
2.3.2. Processo HLAW- GMAW 39
2.4. Análise Química 42
2.5. Ensaios Mecânicos 42
2.5.1. Ensaios de Microdureza 42
2.5.2. Ensaios de Impacto Charpy-V 43
2.6. Ensaio para Medição de Tensões Residuais 44
2.7. Ensaios Metalográficos 44
Capítulo 3 - Resultados 45
3.1 – Soldagem 45
3.2 - Análise Química 46
3.3- Medição de Tensões Residuais 46
3.4- Ensaios Mecânicos 47
3.4.1 - Microdureza 47
3.4.2 – Ensaio de Impacto Charpy-V 50
3.5 – Análise Metalográfica 51
3.5.1 – Macrografia 51
3.5.2- Microscopia Óptica (MO) 52
3.5.3- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 56
Capítulo 4 - Discussão 57
4.1 - Efeito do Ciclo Térmico de Soldagem 57
4.2 - Propriedades Mecânicas 62
4.2.1 - Mapeamento de Microdureza 62

4.2 2- Relação Tenacidade x Microestrutura..... 63
4.3- Análise Geral dos Resultados 65
Conclusão..... 66
Sugestões Para Trabalhos Futuros..... 67
Referências Bibliográficas:..... 68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Efeito da combinação do LASER com o arco elétrico no processo híbrido do experimento de Steen: (a) arco estável e (b) arco instável [1]	17
Figura 1.2	Relação entre penetração e potência do LASER utilizado na soldagem autógena. [6]	19
Figura 1.3	Diagrama esquemático do processo HLAW-GMAW [12]	21
Figura 1.4	Cabeçote comercial para o processo HLAW-GMAW	22
Figura 1.5	Macrografia ilustrando o aspecto do cordão de solda típico do processo HLAW-GMAW, indicando a zona do arco e a zona do LASER [18]	23
Figura 1.6	Macrografia de uma junta de aço estrutural soldada com o processo híbrido usando um consumível de aço inoxidável. [4]	24
Figura 1.7	Medição do teor de Cr ao longo do eixo da solda híbrida em aço estrutural com metal de adição do tipo inoxidável [6]	24
Figura 1.8	Macrografias mostrando soldas HLAW-GMAW com diferentes geometrias de cordão [18]	26
Figura 1.9	Aspecto visual dos defeitos do tipo excesso de penetração pontual localizado na raiz da solda realizada com o modo "keyhole" [20]	28
Figura 1.10	Mapa mostrando a janela operacional do processo HLAW-GMAW [6]	29
Figura 1.11	Efeito da contração do arco elétrico na soldagem HLAW-GMAW (a) em relação ao arco elétrico GMAW com os mesmos parâmetros de soldagem (b) [2]	32
Figura 1.12	Comparação entre a seção transversal da solda experimental e da simulação (esquerda) e simulação do perfil 3D da poça de fusão (direita)[31]	33
Figura 1.13	Efeito da posição relativa entre o feixe LASER e o arco elétrico.[32]	35
Figura 2.1	Corpo de prova usado na soldagem com o processo HLAW-GMAW	37
Figura 2.2	Corpo de prova usado na soldagem com o processo GMAW	37
Figura 2.3	Sequência dos cordões no preenchimento da junta soldada com Processo GMAW	39
Figura 2.4	Desenho esquemático da junta soldada HLAW-GMAW em passe único	40
Figura 2.5	Desenho esquemático da junta HLAW-GMAW com passe de acabamento pelo processo GMAW	41
Figura 2.6	Desenho esquemático mostrando a posição de retirada do corpo de prova Charpy-V da junta HLAW-GMAW. Cotas em mm	43
Figura 2.7	Desenho esquemático mostrando a posição de retirada do corpo de prova Charpy-V da junta HLAW-GMAW com passe de enchimento GMAW. Cotas em mm	43
Figura 2.8	Desenho esquemático mostrando a posição de retirada do corpo de prova Charpy-V da junta GMAW. Cotas em mm	43
Figura 3.1	Aspecto visual da raiz das juntas soldadas com os processos HLAW-GMAW (a) e GMAW (b)	45

Figura 3.2	Mapeamento de microdureza da junta soldada HLAW-GMAW sem cordão de acabamento	47
Figura 3.3	Mapeamento de microdureza da junta soldada HLAW-GMAW com cordão de acabamento	48
Figura 3.4	Mapeamento de microdureza da junta soldada GMAW	48
Figura 3.5	Comparação entre os perfis transversais de microdureza das juntas soldadas híbridas a 5,0mm da raiz, com (CCA) e sem (SSA) o cordão de acabamento, e da junta soldada GMAW	49
Figura 3.6	Comparação entre os perfis de microdureza das juntas soldadas híbridas ao longo da espessura, com (CCA) e sem (SCA) o cordão de acabamento e da junta soldada GMAW	49
Figura 3.7	Resultado do ensaio de impacto realizado no metal de solda	51
Figura 3.8	Macrografia da junta soldada híbrida LASER-GMAW sem o cordão de acabamento	51
Figura 3.9	Macrografia da junta soldada HLAW-GMAW com o cordão de acabamento efetuado com o processo GMAW	52
Figura 3.10	Macrografia da junta soldada GMAW	52
Figura 3.11	Microestrutura dos metais de solda (MO). Ataque: Nital 2%	54
Figura 3.12	Microestrutura da região central da ZTA das juntas soldadas (MO). Ataque: Nital 2%	55
Figura 3.13	Aspecto das microfases da região central do metal de solda (5,0mm da superfície) e no metal base (MEV). Ataque Nital 2%	56
Figura 4.1	Desenho esquemático do cabeçote de soldagem HLAW-GMAW com os ângulos de inclinação do Feixe Laser e Tocha GMAW	59
Figura 4.2	Efeito da composição química na tenacidade ao impacto de metais de solda C-Mn baixa liga segundo diversos autores [43-51]	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Parâmetros e condições de soldagem que influenciam o desempenho do processo HLAW-GMAW	25
Tabela 2.1	Composição química dos materiais utilizados	36
Tabela 2.2	Parâmetros de Soldagem utilizados no Processo GMAW	38
Tabela 2.3	Parâmetros de Soldagem utilizados no processo HLAW-GMAW	41
Tabela 2.4	Parâmetros de soldagem utilizados no cordão de acabamento com o processo GMAW	42
Tabela 3.1	Análise química das juntas soldadas e diluição	46
Tabela 3.2	Tensões residuais medidas nas juntas soldadas	46
Tabela 3.3	Resultado do Ensaio de Impacto Charpy a temperatura ambiente (23°C) SCA = Sem Cordão de Acabamento / CCA = Com Cordão de Acabamento	50
Tabela 3.4	Percentual de ferrita acicular nos metais de solda	53
Tabela 4.1	Comparação entre o tempo de soldagem e consumo de arame-eletrodo entre os processos de soldagem HLAW-GMAW x GMAW	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Intensidade de Corrente em Amperes
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Aporte Térmico em kJ/mm
AWS	American Welding Society
CCA	Com Cordão de Acabamento
CCT	Continuous Cooling Transformation
CMT	Cold Metal Transfer
e	Espessura em milímetros
EWI	Edison Welding Institute
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HYBLAS	Economical and Safe Laser Hybrid Welding of Structural Steel
HLAW	Hybrid Laser Arc Welding
HV	Vickers Hardness
J	Joule
kJ	Quilojoule
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LBW	Laser Bean Welding
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
MIG	Metal Inert Gas
MS	Metal de Solda
P	Perlita
PD	Perlita degenerada
SCA	Sem Cordão de Acabamento
Yd:YAG	Ytterbium doped Yttrium Aluminum Garnet
V	Tensão em Volts
W	Watt
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Introdução

A tecnologia LASER foi desenvolvida em meados do século passado (1960), tendo sido aplicada no corte térmico, e em seguida, como decorrência natural, no processo de soldagem de materiais metálicos [1]. A alta concentração de calor proporcionada pelo feixe LASER colimado, logo se mostrou como uma ferramenta muito promissora para a aplicação na soldagem. Entretanto, o passar dos anos mostrou que a necessidade de uma preparação de junta com pouca margem de variação para a obtenção de boa reprodutibilidade na operação, aliado ao alto custo das fontes LASER de alta potência, tornaram o processo limitado à aplicações onde o volume de produção justificava esse alto investimento [2]. Dispositivos de soldagem sofisticados e processos de corte de alta qualidade são requisitos básicos para garantir o grau de preparação de junta necessário à obtenção de soldas LASER consistentes e de alto desempenho [2-3].

Esta limitação do processo de soldagem LASER apresentada no parágrafo anterior ensejou o desenvolvimento de tecnologias híbridas de soldagem, de modo a aproveitar as grandes vantagens do processo de soldagem LASER e mitigar suas limitações [4]. Inúmeros processos foram desenvolvidos (TIG-LASER, MIG-LASER, Plasma-LASER, GMAW Duplo Arame-LASER, etc.), todos buscando aumentar a capacidade do processo em resistir a pequenas falhas na preparação da junta [4-6]. Em paralelo, o rápido desenvolvimento da tecnologia LASER, produzindo equipamentos de menor custo, compactos e de maior potência, justificou esse investimento na aplicação da soldagem LASER, pois essa tecnologia passou a ser mais viável, no que se refere ao investimento inicial. Estudar os fenômenos que decorrem da interação entre o feixe LASER e o arco elétrico nos processos híbridos (HLAW) passou a ter maior relevância e urgência, em função do incremento de seu potencial de aplicação [7-8].

O processo híbrido tem um grau de complexidade mais elevado que os processos convencionais, uma vez que além das características inerentes a cada processo individualmente, existe também a necessidade de considerar os fenômenos relacionados com as interações entre os dois processos [6,9]. No caso específico da soldagem HLAW–GMAW os efeitos sinérgicos entre os processos já foram observados experimentalmente e são bastante significativos [9]. O maior desafio

nesse particular é o grande número de variáveis envolvidas, incluindo o tipo de laser utilizado na célula híbrida, além das características geométricas do próprio cabeçote híbrido.

O presente trabalho é um dos pioneiros no Brasil a avaliar essa tecnologia, que já vem sendo utilizada industrialmente nos EUA, na Europa e na Ásia [4,8]. O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho do processo e as propriedades mecânicas de uma junta soldada com o processo HLAW-GMAW, no passe de raiz e enchimento, numa junta de aço C-Mn composta por chapas de 10 mm de espessura. O passe de acabamento foi realizado com o processo GMAW convencional, visando permitir a avaliação do efeito deste passe sobre a estrutura e propriedades do cordão de solda híbrido subjacente.

Capítulo 1 - Revisão Bibliográfica

1.1 O Processo de Soldagem Híbrido LASER-GMAW

1.1.1 Histórico do Processo de Soldagem Híbrido LASER– GMAW

A soldagem LASER híbrida ao arco elétrico foi proposta pela primeira vez por Steen [10], no final dos anos 70. O objetivo dele era aumentar a penetração da solda LASER, sem necessariamente ter que utilizar um equipamento com maior potência. Essa era uma forte limitação naquela época, pois pequenos incrementos na potência do equipamento de geração do LASER eram extremamente caros. A combinação proposta no experimento utilizou LASER CO_2, que era a principal tecnologia LASER disponível, e uma fonte de energia de soldagem ao arco elétrico GTAW [10]. Entretanto, a sinergia observada na interação entre o feixe LASER e o arco elétrico, como apresentado na Figura 1.1, mostrou que havia um potencial muito grande a ser explorado nessa tecnologia híbrida.

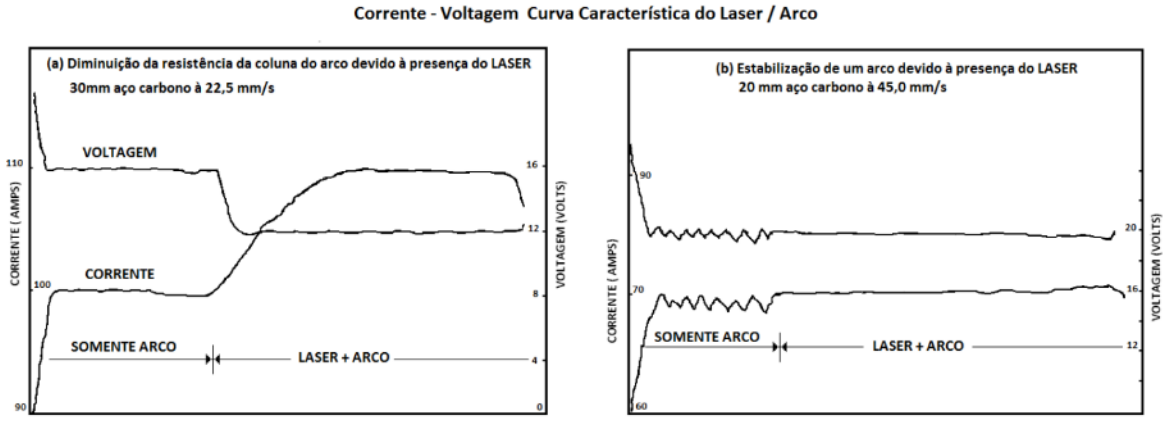


Figura 1.1 - Efeito da combinação do LASER com o arco elétrico no processo híbrido do experimento de Steen: (a) arco estável e (b) arco instável [10]

Na Figura 1.1 percebe-se que tanto no caso (a) - arco estável, como no caso (b) - arco instável, a introdução do LASER provoca uma modificação muito significativa nos valores de tensão e corrente do arco elétrico. No caso do arco estável (a), ocorre

um incremento forte na corrente de soldagem e uma queda na tensão do arco elétrico, que mais tarde foi associada a uma contração no arco elétrico [11]. No caso do arco instável (b) também é evidente que a partir do acionamento do LASER a instabilidade do arco é eliminada e tanto a corrente como a tensão são estabilizadas.

Em 1988, outro trabalho bastante importante foi o de Matsuda [12], no qual ele identificou algumas variáveis do processo que possuem efeito destacado sobre as características geométricas do cordão de solda, tanto para o processo híbrido LASER+GTAW, quanto para o LASER+GMAW. Este experimento foi importante para estabelecer alguns pontos fundamentais na análise da interação entre o feixe LASER e o arco elétrico, em particular, a distância entre essas duas fontes de calor, sendo que ainda logrou êxito na soldagem em passe único de uma junta de topo de 12 mm de espessura de aço C-Mn.

Nos anos 90, o processo GMAW já era bem consolidado, amplamente utilizado na indústria e com boa fundamentação teórica e experimental [5]. Além disso, graças a sua capacidade de fornecer continuamente metal de adição fundido, de não necessitar de fluxo sólido e de não ter formação significativa de escória, tornou-se o processo ao arco elétrico mais utilizado em combinação com o processo Laser Beam Welding (LBW), na soldagem híbrida [5]. Hoje em dia, o termo “soldagem LASER híbrida ao arco elétrico” (designado pela sigla em inglês: HLAW – Hybrid Laser Arc Welding), refere-se quase que exclusivamente a associação entre os processos LBW e GMAW [5].

O rápido desenvolvimento da tecnologia LASER nas últimas décadas contribuiu bastante para a maior disponibilidade de equipamentos de geração de feixes LASER com potências cada vez mais altas e de custo mais acessível [13-14]. Enquanto o experimento de Steen [10] foi realizado com uma fonte LASER de 1,7 kW, hoje já existem equipamentos de 100 kW em operação, como o instalado na Universidade de Osaka, no Japão[14]. O aumento expressivo da utilização da tecnologia LASER nos processos de soldagem contribuiu para evidenciar às suas limitações, principalmente na soldagem de chapas espessas [5-18]. O processo HLAW que já vinha sendo desenvolvido como uma alternativa mais flexível em relação ao processo LBW, passou a receber maior atenção de pesquisadores e desenvolvedores de equipamentos, diante dessa demanda potencial. Em 2009, na Feira de Essen (Alemanha), mais de uma dezena de expositores apresentavam seus cabeçotes para a soldagem HLAW

(Hybrid Laser Arc Welding)-GMAW (Gas Metal Arc Welding) [19].

Em 2015, Nielsen apresentou uma interessante análise sobre as perspectivas e desafios relativos à soldagem HLAW-GMAW [14], na visão europeia. A abordagem foi direcionada à aplicação de LASERS de alta potência (até 100KW) com uma síntese do estado da arte, inclusive citando o reconhecimento da Sociedade Classificadora Naval Lloyds Register of Shipping, uma das mais rigorosas classificadoras europeias para a construção naval, que desde 2005 incluiu o processo HLAW em seu Livro de Regras. A Figura 1.2 apresenta o gráfico utilizado por Nielsen [14] para mostrar a relação entre a profundidade de penetração da solda e a potência do LASER utilizado no processo HLAW-GMAW.

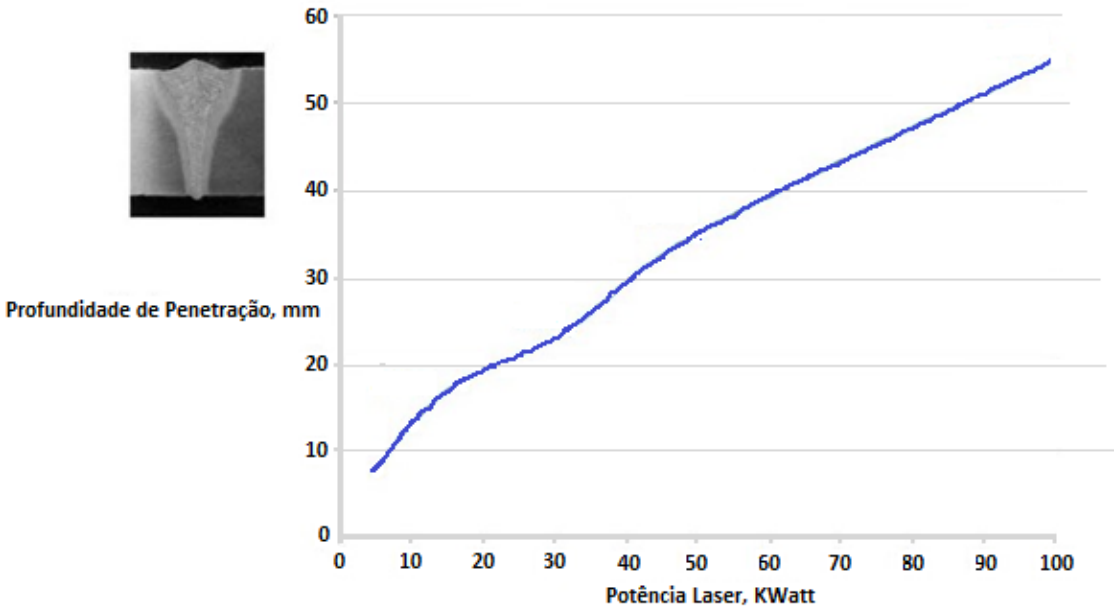


Figura 1.2 - Relação entre penetração e potência do LASER utilizado na soldagem autógena. [14]

A aplicação do processo HLAW (Hybrid Laser Arc Welding) vem crescendo ao longo dos anos, pela redução do custo do investimento inicial, aumento da potência das fontes LASER disponíveis e, maior volume de informações com dados empíricos sobre desempenho do processo [16].

1.1.2 Fundamentos do Processo de Soldagem HLAW-GMAW

O desenvolvimento de um processo de soldagem híbrido tem por objetivo o incremento ou pelo menos a manutenção das vantagens de cada um dos processos individualmente, e adicionalmente, a superação de algumas das suas limitações [5,14]. No caso do HLAW, o processo ao arco elétrico que possui as melhores características para se combinar com o LASER é o GMAW. Isso porque, ele pode ser muito bem controlado, de modo a fornecer continuamente a quantidade adequada de metal de adição fundido para o preenchimento das irregularidades da junta e do próprio chanfro, sem perturbar a ação do LASER. Desse modo, o LASER pode proporcionar uma maior penetração e velocidade de soldagem, uma ZTA estreita, além de promover níveis de distorção na junta soldada bastante reduzidos [5-18]. Outro problema que é bastante relevante e frequentemente indicado na soldagem autógena com o processo LBW, particularmente em chapas espessas e em aços de alta resistência, é a impossibilidade de utilizar o metal de adição para interferir na microestrutura final do metal de solda. Esse problema também pode ser mitigado com emprego do processo HLAW-GMAW [15-18].

Pelo que foi descrito no parágrafo anterior, fica claro que o processo HLAW-GMAW utiliza as características individuais dos dois processos de forma complementar, produzindo um processo híbrido mais robusto e que expande a aplicabilidade dos processos LBW e GMAW. A combinação desses dois processos gera ainda, um efeito sinérgico que permite obter velocidades de soldagem superiores ao valor da soma das velocidades dos dois processos individualmente, com alta estabilidade [11].

A Figura 1.3 apresenta um diagrama esquemático do processo HLAW-GMAW, com os componentes do sistema híbrido de soldagem [20]. O principal aspecto do sistema de soldagem para caracterizar o processo híbrido é que a distância entre o arco elétrico e o ponto de incidência do feixe LASER no material, não seja muito grande, de modo a garantir que haja a interação entre os processos. Em geral, essa distância deve ser limitada a 5 mm [16].



Figura 1.3 - Diagrama esquemático do processo HLAW-GMAW [20]

Evidentemente, que em função das velocidades de soldagem praticadas no processo HLAW-GMAW, bem como às características do próprio feixe LASER, o processo é essencialmente mecanizado ou robotizado. Existem cabeçotes específicos dedicados ao processo, nos quais a tocha e o dispositivo ótico para focalização do feixe são integrados, como mostrado na Figura 1.4. Entretanto, diversos pesquisadores desenvolveram seus próprios suportes customizados para a realização dos seus estudos [16, 5-24].



Figura 1.4 - Cabeçote comercial para o processo HLAW-GMAW

A proteção gasosa no processo HLAW-GMAW é normalmente aplicada pelo bocal da tocha GMAW, sendo que em alguns experimentos há a utilização de uma proteção gasosa adicional, tipo “trailing gas” [13]. A composição da mistura gasosa depende do tipo de LASER utilizado, do metal de base a ser soldado, das características da fonte de energia GMAW selecionada e do modo de transferência desejado na soldagem. No que concerne ao tipo de LASER utilizado [16], isso define o comprimento de onda da radiação LASER, e consequentemente, a possibilidade de transportá-lo por fibra ótica ou espelhos e sua tendência à formação do plasma pela ionização do gás de proteção. O LASER CO_2 (λ = 10,6μm) é o tipo que possui o comprimento de onda uma ordem de grandeza maior que a maioria dos LASERS de aplicação industrial. Portanto, este apresenta limitação para o uso de fibra ótica na transmissão do feixe, e também tem forte tendência à formação de plasma com misturas gasosas ricas em argônio, quando usado com potências acima de 4kW. Nesses casos, a recomendação é usar uma mistura gasosa com pelo menos 50% de Hélio, visando evitar a formação do plasma, que provoca atenuação no feixe [12, 16,25].

O cordão de solda típico do processo híbrido LASER-GMAW é caracterizado por apresentar uma penetração profunda e bem estreita, e aspecto geral tipo taça, como mostra a Figura 1.5 [4]. Nessa figura estão demarcadas duas regiões: a zona do arco e a zona do LASER. A zona do arco é a região do cordão de solda onde predominam às características do processo GMAW, com a transferência metálica sendo realizada por meio de uma atmosfera gasosa de proteção. Essa região é larga e apresenta uma participação significativa do metal de adição na composição do metal de solda (menor diluição). Na zona do LASER, às características são mais próximas a da solda LBW autógena (diluição próxima a 100%, ou seja, pouca ou nenhuma participação do metal de adição). O trabalho de Acuña [5] faz referência a um experimento realizado pelo EWI (Edison Welding Institute), no qual a soldagem híbrida LASER-GMAW foi executada numa junta de aço C-Mn estrutural, sendo que foi utilizado como metal de adição um arame-eletrodo de aço inoxidável. Nesse experimento, ficou bem evidente, que a diluição na região do arco elétrico é bem menor (maior participação do metal de adição), enquanto que na região do laser próximo à raiz, a diluição é praticamente a da solda autógena. A figura 6 apresenta a macrografia da solda referente a esse experimento.

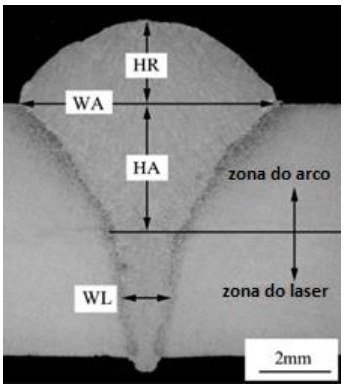


Figura 1.5 - Macrografia ilustrando o aspecto do cordão de solda típico do processo HLAW-GMAW, indicando a zona do arco e a zona do LASER [4].

Outros autores [4, 13, 14, 16] avaliaram a questão da diluição na solda HLAW-GMAW e verificaram que existe uma forte variação nos valores obtidos, dependendo dos parâmetros de soldagem selecionados e também da geometria do chanfro. A Figura 1.6 serve como uma referência para aplicações de alguns casos que foram obtidos perfis com distribuição bastante homogênea ao longo do eixo da solda, como na Figura 1.7. A diferença de distribuição do metal de adição no metal de solda nesses

dois casos mostra a importância da seleção de parâmetros e as condições de soldagem no processo HLAW-GMAW.

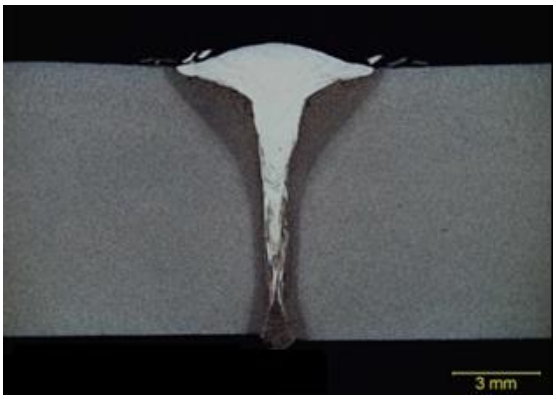


Figura 1.6 - Macrografia de uma junta de aço estrutural soldada com o processo híbrido usando um consumível de aço inoxidável. [13]

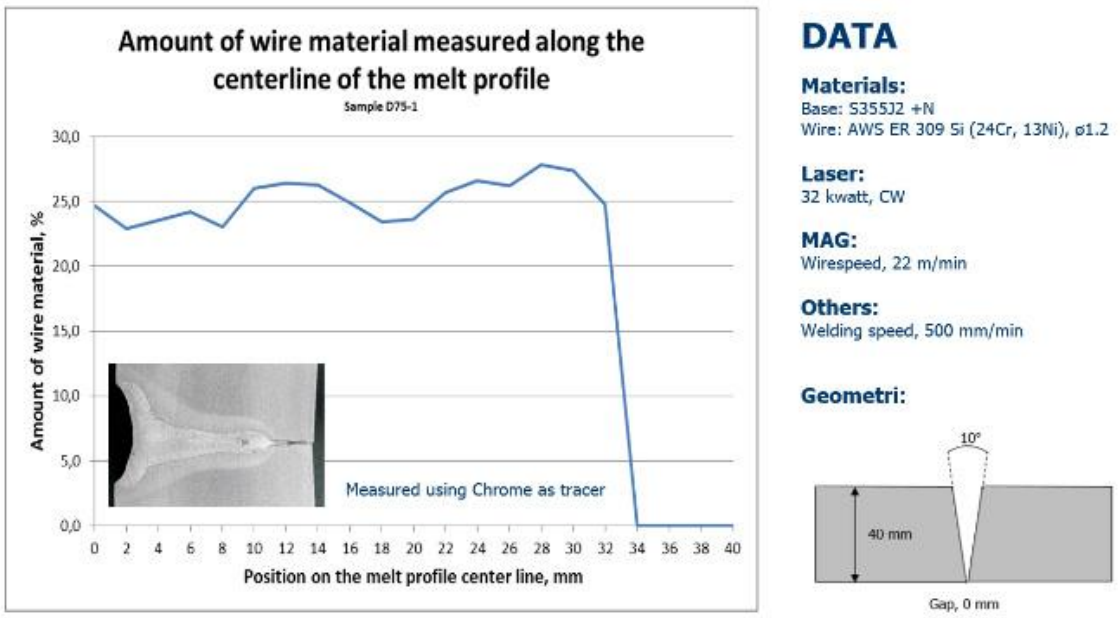


Figura 1.7 - Medição do teor de Cr ao longo do eixo da solda híbrida em aço estrutural com metal de adição do tipo inoxidável [22]

1.1.3 Parâmetros de Soldagem do Processo HLAW-GMAW

Na soldagem híbrida HLAW-GMAW deve-se considerar todos os parâmetros de soldagem referentes aos dois processos envolvidos individualmente, como também aqueles específicos relacionados com a interação entre estes. A Tabela 1.1 apresenta os parâmetros de soldagem referentes a cada processo (LASER, GMAW e Híbrido), sendo que os parâmetros e condições de soldagem que são comuns aos três processos, estão na coluna única.

Tabela 1.1 - Parâmetros e condições de soldagem que influenciam o desempenho do processo HLAW-GMAW

LASER	GMAW	Híbrido
✓ Potência do LASER ✓ Posição focal ✓ Modo de operação ✓ Diâmetro do feixe LASER ✓ Polarização ✓ Características construtivas ✓ Comprimento de onda ✓ Modulação do feixe LASER	✓ Tensão do arco ✓ Velocidade de alimentação de arame ✓ Modo de operação ✓ Diâmetro e composição do arame-eletrodo ✓ Extensão livre do eletrodo ✓ Ângulos da tocha ✓ Diâmetro do bocal da tocha	✓ Distância feixe-arco ✓ Ângulo feixe-arco ✓ Direção de soldagem (arco liderando ou feixe liderando)
✓ Velocidade de soldagem ✓ Tipo e vazão do gás de proteção	✓ Projeto da junta ✓ Posição de soldagem	

A variação dos parâmetros e das condições de soldagem do processo HLAW-GMAW afeta a distribuição de calor na poça de fusão, e consequentemente tem influência na forma geométrica, na microestrutura e nas propriedades mecânicas do cordão de solda [4,12-18,22]. Particular importância tem os parâmetros geométricos do chanfro, pois estes afetam não só a distribuição do calor, como também o fluxo do metal fundido, sendo determinante na definição do perfil do cordão de solda [4,16].

Gao *et al* [4] observaram que o aumento no valor da intensidade de corrente elétrica de soldagem produz maior pressão do arco elétrico sobre o "keyhole" produzido pelo LASER. A maior força do arco elétrico promove o direcionamento da sua energia para a raiz da solda, aumentando a uniformidade de distribuição de calor na poça de fusão, e consequentemente, diminuindo a diferença entre as dimensões das regiões do arco e do LASER. A Figura 1.8 ilustra esse efeito que foi parametrizado pela razão entre as energias do LASER e do arco (ER_{LA}) no trabalho de Gao [4].

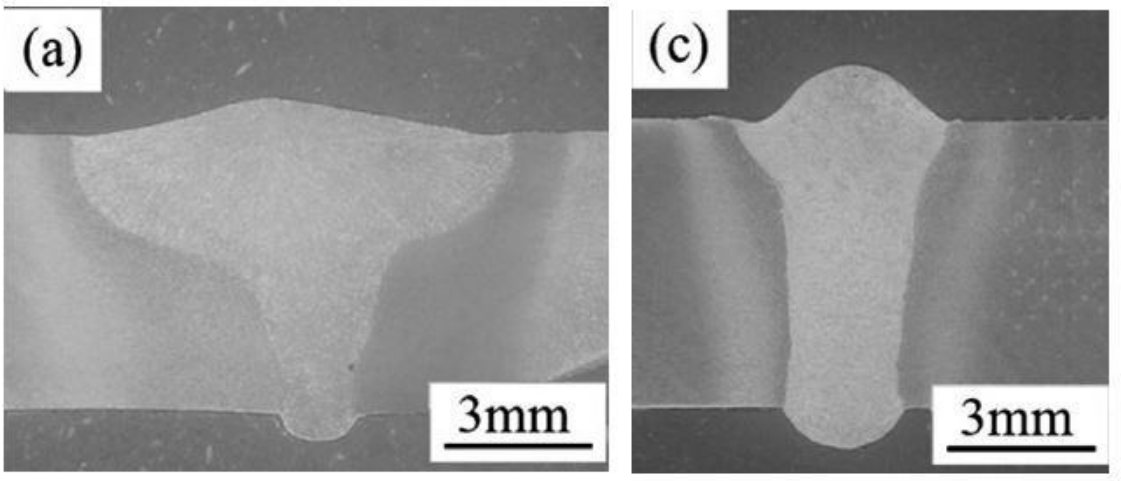


Figura 1.8 - Macrografias mostrando soldas HLAW-GMAW com diferentes geometrias de cordão [5]

Nesse mesmo trabalho [4] foi mostrado que a área da seção transversal do chanfro também é bastante efetiva para reduzir a diferença entre as dimensões das regiões do arco e do LASER. A abertura da raiz é uma importante condição nesse aspecto, permitindo que o metal fundido escoe para um melhor controle da

penetração. Entretanto, apesar da maior flexibilidade do processo HLAW-GMAW para superar variações na abertura da junta, quando comparado ao processo LBW, aberturas maiores que 3,0 mm são muito difíceis de serem compensadas. Nesses casos, o processo perde gradualmente a sua característica híbrida e tende para o GMAW convencional [16].

O controle do preenchimento de aberturas irregulares da junta, que é uma das vantagens mais destacadas do processo híbrido, é ainda uma questão bastante estudada e controversa. Lamas, et al. [26] utilizaram fontes de soldagem GMAW pulsadas e com transferência controlada (CMT - "Cold Metal Transfer") para avaliar a interferência do modo de transferência metálica sobre esse mecanismo. Eles confirmaram a faixa entre 1,0 mm a 1,5 mm como o limite para a abertura da junta de topo e não observaram diferença significativa entre esses dois modos de transferência, tanto no que concerne a capacidade de redistribuir o metal de adição fundido, como no preenchimento de pequenas aberturas. Para as aberturas de juntas maiores, os dois modos de transferência foram igualmente ineficientes para promover a interação do LASER com a região da raiz, de modo a fundir as arestas do chanfro adequadamente.

Li et al. [27] fizeram uma extensa revisão sobre o efeito de diversos parâmetros e condições de soldagem sobre o modo de transferência metálica na soldagem HLAW-GMAW. Em particular, eles avaliaram a influência da corrente de soldagem, dimensões do chanfro e forças devidas ao modo de transferência metálica em uma junta de topo com chanfro ultra estreito e definiram faixas de parâmetros de soldagem para a obtenção de juntas soldadas isentas de defeitos (poros, falta de fusão, respingos e penetração irregular).

Blecher et al. [28] desenvolveram uma investigação bastante minuciosa sobre a formação de um defeito na raiz da solda, típico de processos que utilizam o modo "keyhole". Esse defeito é promovido pela penetração excessiva localizada, formando pontos metálicos esféricos na raiz da solda, como mostrado na Figura 1.9. Com a maior disponibilidade de LASERS de potências mais elevadas, esse problema passa a ser mais comum e muito relevante, em particular na soldagem de chapas espessas. Esse defeito recebeu várias designações diferentes de pesquisadores que o relataram em trabalhos técnicos, mas ainda não possui uma identificação universal na terminologia da soldagem. Blecher [28] o designou como "root humping" e no presente

texto ele será identificado simplesmente como "hump".

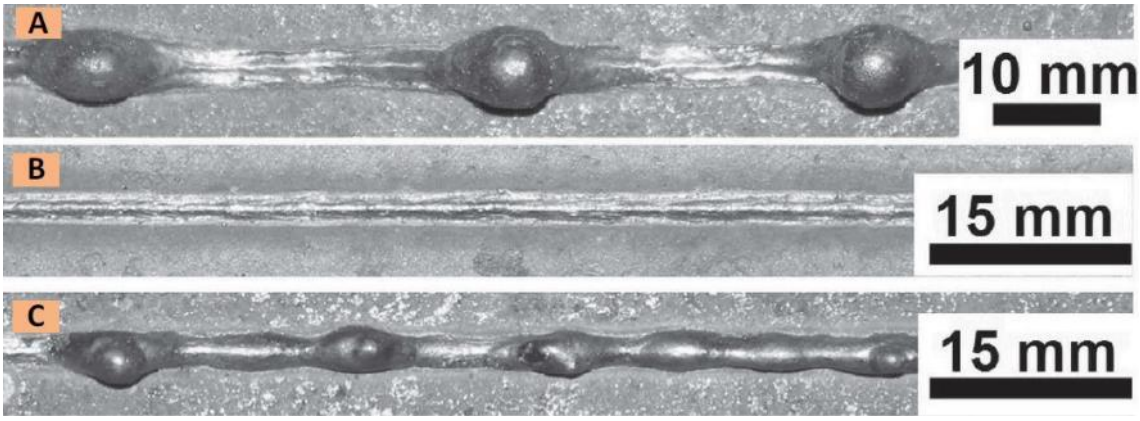


Figura 1.9 - Aspecto visual dos defeitos do tipo excesso de penetração pontual localizado na raiz da solda realizada com o modo "keyhole" [27]

Segundo Ilar *et al*.[29] o defeito na raiz do tipo "hump" é formado por uma associação de efeitos atribuídos à tensão superficial, à gravidade e à disponibilidade de metal fundido (pressão hidrostática). Portanto, aumentando o volume da poça de fusão e/ou reduzindo a tensão superficial na região da raiz, criam-se condições mais propícias à formação do "hump". A presença de oxigênio no metal fundido tem um efeito significativo sobre a tensão superficial. Com adições de 0,06 a 0,1% de oxigênio a tensão superficial cai em 50% ou mais, em comparação ao metal sem oxigênio [30]. No experimento de Blecher [28] o teor de oxigênio no metal de solda foi controlado indiretamente, pela remoção da camada de óxido na superfície da junta. Nesse mesmo experimento [28], a pressão hidrostática foi controlada pela variação do volume de metal fundido, através da energia de soldagem.

Gook et. al. [31] também enfrentaram problemas de "hump" na soldagem de aços de alta resistência com o processo híbrido. A solução para o problema foi obtida através do aumento da velocidade de soldagem e do aumento da potência do LASER O aumento da velocidade de soldagem para reduzir o volume da poça de fusão e o aumento da potência para assegurar a penetração total na junta.

O projeto HYBLAS [14,16], coordenado pela Comissão Europeia cujo objetivo é desenvolver as melhores práticas e técnicas de soldagem no processo HLAW-GMAW, produziu uma importante contribuição em chapas espessas (até 30 mm). O projeto foi

bastante abrangente, pois incluiu experimentos tanto com LASER CO_2 até 20 kW de potência como com LASER Nd:YAG de até 7,2 kW potência. O escopo do projeto considerava a investigação detalhada do efeito dos principais parâmetros de soldagem, visando identificar janelas operacionais nas quais seria possível realizar a soldagem no tipo de aço e a espessura de interesse. Investigou também os principais defeitos de soldagem e formas de detectá-los e preveni-los, bem como a avaliação do comportamento mecânico da junta soldada, diante de diversos requisitos, inclusive fratura e fadiga. O projeto foi muito bem-sucedido e produziu diversos mapas com janelas operacionais como a apresentada na Figura 1.10.

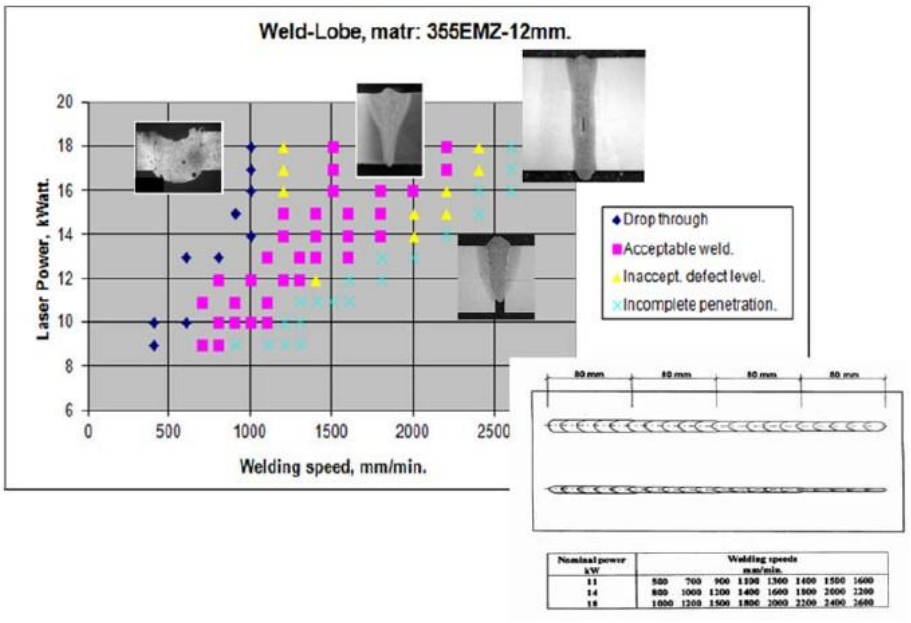


Figura 1.10 - Mapa mostrando a janela operacional do processo HLAW-GMAW [22]

Praticamente todos os trabalhos apresentados nessa revisão fazem alusão ao complexo processo de seleção de parâmetros na soldagem HLAW-GMAW. Moradi et al.[32] utilizaram a análise estatística de experimentos, suportada pelos registros de uma câmera de alta velocidade, para avaliar o efeito de três parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo. Apesar da coerência dos resultados obtidos, os autores [32] destacam que a análise requer uma preparação muito esmerada e extremo cuidado na avaliação dos resultados. O trabalho de Suder [33] traz uma importante contribuição no que concerne a dificuldade que existe em transportar resultados obtidos numa célula híbrida para outra, em função das características específicas de cada LASER, particularmente o diâmetro do feixe LASER. Este autor

[33] propõe a utilização do fator de potência como alternativa para viabilizar essas transposições de resultados.

1.1.4 Aspectos Térmicos na Soldagem com o Processo HLAW-GMAW

O LASER transfere energia para a peça que será soldada diretamente pela absorção de Fresnel dos fótons presentes no feixe [33]. Os processos ao arco elétrico transferem calor para o material de base através da coluna de plasma de alta temperatura, produzida pela ionização do gás de proteção no arco elétrico. Na soldagem GMAW ainda há uma parcela do calor que é transmitida à peça pelas gotas metálicas de metal de adição fundido. Essas gotas aumentam sua temperatura quando atravessam a coluna do arco elétrico e transportam essa energia para a poça de fusão [33].

No processo híbrido, além dos mecanismos que operam individualmente nos processos, existe uma interação entre eles que aumenta a eficiência de fusão. Alguns autores atribuem esse efeito à melhoria da emissão termiônica no spot do anodo, o que produz um incremento na densidade de corrente [10,34]. Outros autores atribuem esse ganho à interação entre o arco elétrico e o plasma produzido pelo LASER, ou mesmo à maior absorção do LASER provocada pelo arco elétrico [33-35].

Hu *et al*. [11] desenvolveram um experimento para mensurar o efeito sinérgico do processo HLAW-GMAW através de dois fatores:

Eficiência térmica (η_h), é a fração do calor produzido pelas fontes de energia, que é transferida para peça a ser soldada.

Eficiência de fusão (η_m), é a fração do calor sendo transferido para a peça, que é efetivamente utilizado na sua fusão.

$$\eta_h = \frac{Q_i}{Q_0} \quad (1)$$

$$\eta_m = \frac{Q_m}{Q_i} = A.v.\rho \left(\int_{T_O}^{T_m} C_p dT + H_f \right) / Q_i \quad (2)$$

Onde Q_0 é a energia de soldagem (o calor produzido pelas fontes de energia), Q_i é a taxa de transferência de calor (o calor transferido da fonte de energia para a peça na unidade do tempo), A é a área da seção transversal da solda, v é a velocidade de soldagem, ρ é a densidade do metal de base, C_p é a capacidade térmica do metal de base, T é a temperatura, T_o é a temperatura ambiente, T_m é a temperatura de fusão do metal de base e H_f é o calor latente de fusão do metal de base.

No experimento de Hu [11] o valor de *Qi* foi medido usando um calorímetro e *Qm* foi determinado a partir da medição da seção transversal das soldas e pela Equação 2. A eficiência de fusão foi determinada também pela equação de Rosenthal modificada para comparar com os resultados experimentais [11]. Para avaliar o efeito sinérgico o experimento foi realizado em duas situações: LASER e arco elétrico atuando separadamente (afastados fisicamente) e LASER e arco elétrico atuando em conjunto (na mesma poça de fusão).

Os resultados demonstraram que a eficiência térmica do processo híbrido é praticamente igual ao do processo com o LBW e o arco elétrico atuando separadamente. A eficiência de fusão do processo híbrido, por outro lado, mostrou-se significativamente maior que o sistema composto pelo arco elétrico e LBW atuando separadamente. O efeito sinérgico foi explicado em função do aumento da densidade de energia, causado pela adição das duas fontes de energia, e pela contração do arco elétrico, como mostrado na Figura 1.11

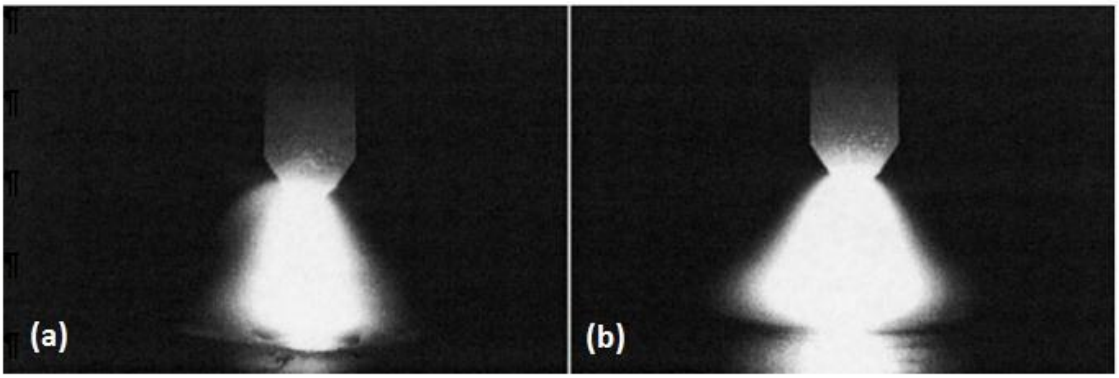


Figura 1.11 - Efeito da contração do arco elétrico na soldagem HLAW-GMAW (a) em relação ao arco elétrico GMAW com os mesmos parâmetros de soldagem (b) [19]

Moore *et al*. [36] fizeram uma comparação entre o processo híbrido com arame-eletrodo tubular do tipo “metal-cored” e o LBW autógeno, na soldagem de aços de dutos. Os autores usaram valores de eficiência térmica testados em trabalhos anteriores, no caso, 0,78 para a eficiência térmica do LASER e 0,80 para o GMAW, de modo que a energia transferida para a junta foi a soma ponderada da energia dos dois processos individualmente. Na soldagem híbrida o aporte de energia foi de 0,563 kJ/mm e o $\Delta t_{8/5}$ foi de 2,9s.

Karlsson *et al*. [37] desenvolveram um trabalho para soldar aços de alta resistência com diferentes processos de soldagem, visando avaliar o efeito da diluição nas propriedades da junta soldada. Nesses materiais que desenvolvem alta resistência por processos termomecânicos e não por adição de elementos de liga, a soldagem é feita com material de adição com composição química diferente do metal de base. Nesse caso, a diluição e a extensão da ZTA são importantes na determinação das propriedades da junta soldada. As chapas de 12 mm de espessura foram soldadas com 6 processos diferentes, entre eles o HLAW-GMAW. A soldagem híbrida foi realizada em passe único, sendo que o Δt8/5 foi de 5s (medido com termopar) e a diluição foi de 72%. As soldas com o processo HLAW-GMAW apresentaram bom desempenho quando comparadas com os demais processos.

Wei *et al*. [38] desenvolveram um sistema de simulação que permite uma análise completa do perfil do cordão de solda, condições de resfriamento e microestrutura a ser obtida, a partir de um conjunto de parâmetros de soldagem para o

processo HLAW-GMAW. O modelo tridimensional apresentou boa concordância com os dados experimentais, como pode ser observado na Figura 1.12. No experimento foi avaliado o efeito da velocidade de soldagem e da distância feixe LASER-arco sobre as características geométricas da poça de fusão, a taxa de resfriamento e a microestrutura obtida numa junta de aço DH 36 com 4,8mm de espessura.

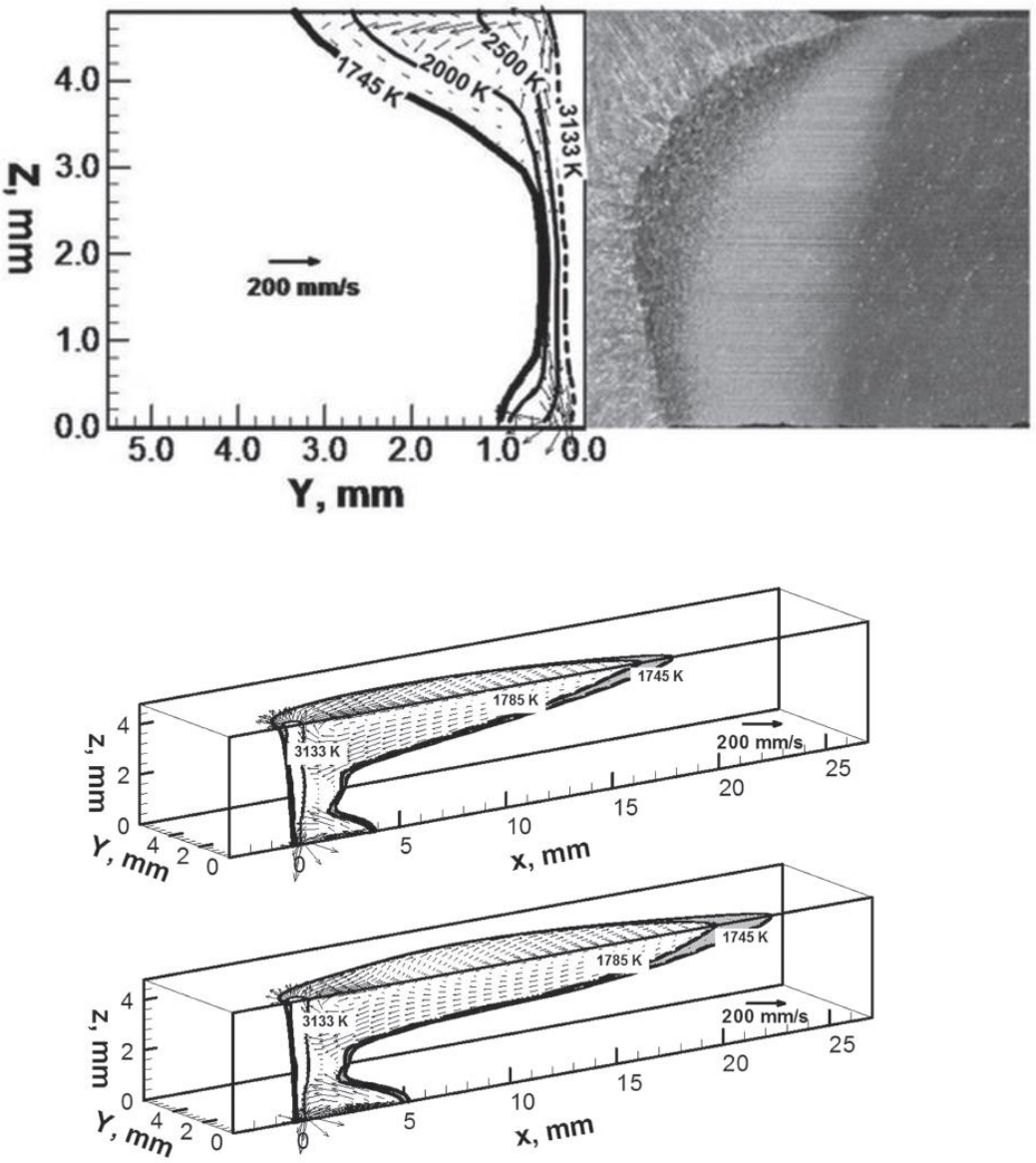


Figura 1.12 - Comparação entre a seção transversal da solda experimental e da simulação (esquerda) e simulação do perfil 3D da poça de fusão (direita) [38]

A análise do efeito da variação da velocidade de soldagem mostrou que seu aumento produz um estreitamento da poça de fusão, em toda a espessura, e reduz a energia absorvida pelo metal de base. Já a distância entre o feixe LASER e o arco elétrico, quando aumentada produz um aumento na poça de fusão, mas este ocorre essencialmente na superfície do cordão e não se estende ao longo da espessura. O modelo foi usado também para calcular o $\Delta t_{8/5}$ no metal de solda e na ZTA. Nas condições experimentais do trabalho, a variação da velocidade de soldagem de 20 mm/s para 30 mm/s produziu uma variação na taxa de resfriamento de 21,3 para 48,4 K/s. Essa variação na taxa de resfriamento representa que o tempo de resfriamento variou de 14,1 para 6,2 s. Com esses dados e as curvas CCT do material, foi possível prever os microconstituintes obtidos e as respectivas frações volumétricas [38].

O modelo desenvolvido permitiu a elaboração de um mapa do processo que mostra as combinações de parâmetros que produz uma dada velocidade de resfriamento, e consequentemente, a correspondente microestrutura. Em geral, a velocidade de soldagem tem um efeito maior sobre a taxa de resfriamento que a distância entre o feixe LASER e o arco elétrico. Esses mapas proporcionam um entendimento da evolução da microestrutura durante a soldagem HLAW-GMAW.

A extensa revisão feita por Bagger e Olsen [39] sobre o processo HLAW, destaca a importância de cada parâmetro de soldagem sobre o desempenho do processo. No caso específico da distância entre o feixe LASER e o arco elétrico, há uma recomendação quando o objetivo primordial é a penetração. Nesse caso, o feixe deve ser posicionado na extremidade do arco, mas ainda em contato com o plasma deste, conforme mostrado na Figura 1.13. Nesta figura observa-se também que essa posição do feixe LASER dentro da cavidade favorece a sua absorção, da mesma forma que o preaquecimento.

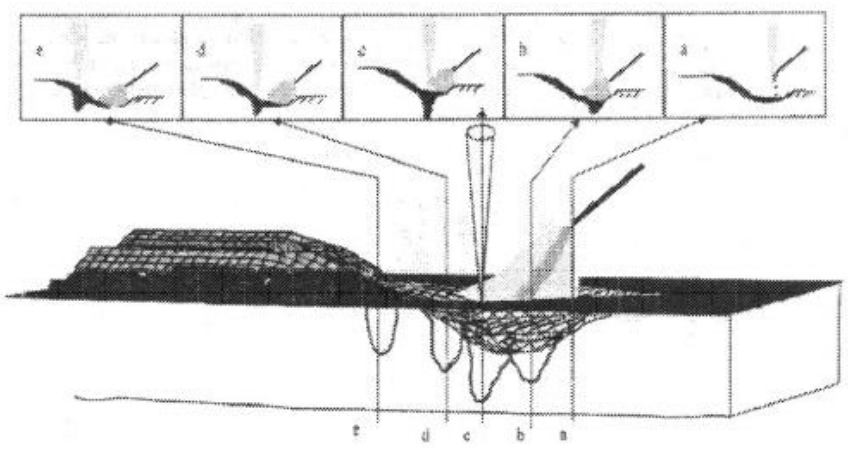


Figura 1.13 - Efeito da posição relativa entre o feixe LASER e o arco elétrico.[39]

Na direção longitudinal, o metal líquido flui da ponta do “keyhole” para a retaguarda da poça de fusão. Esse fluxo é intenso e cria uma convecção eletromagnética que alarga o cordão de solda.

Bagger e Olsen [39] complementam sua análise afirmando que não é possível estabelecer regras gerais visando à otimização de cada parâmetro na soldagem no processo HLAW-GMAW, uma vez que esta depende de muitas circunstâncias específicas. Dessa forma, diretrizes e recomendações funcionam apenas como ponto de partida para a otimização dos parâmetros específicos para uma dada aplicação e para um sistema de soldagem.

Capítulo 2 – Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Como material de base foram utilizadas chapas de aço C-Mn com dimensões de 170 mm x 55 mm x 10 mm para a soldagem HLAW-GMAW e 200 mm x 65 mm x 10 mm para a soldagem GMAW, cuja composição química é apresentada na Tabela 2.1.

Como material de adição, foi utilizado o arame-eletrodo de classificação AWS A 5.18 e especificação ER 70S-6 [40] com 1,0 mm de diâmetro. A Tabela 2.1 mostra a composição química deste consumível, conforme certificado de qualidade fornecido pelo fabricante.

Tabela 2.1 - Composição química dos materiais utilizados

Material	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Fe
Metal Base	0,184	0,430	0,0276	0,0137	0,0130	Bal
Metal de Adição	0,08	1,45	0,95	0,011	0,013	Bal

2.1.1. Corpos de Prova

A Figura 2.1 e Figura 2.2 mostram a geometria das chapas preparadas para a soldagem pelos processos HLAW-GMAW e GMAW, respectivamente, considerando os aspectos dimensionais para a preparação da junta.

Para soldagem pelo processo HLAW-GMAW, as chapas foram preparadas com chanfro reto e afastamento de 0,5 mm. Para o processo de soldagem GMAW, as chapas foram preparadas com chanfro em V, com ângulo de 70°, nariz de 1 mm e afastamento de 3,0 mm.

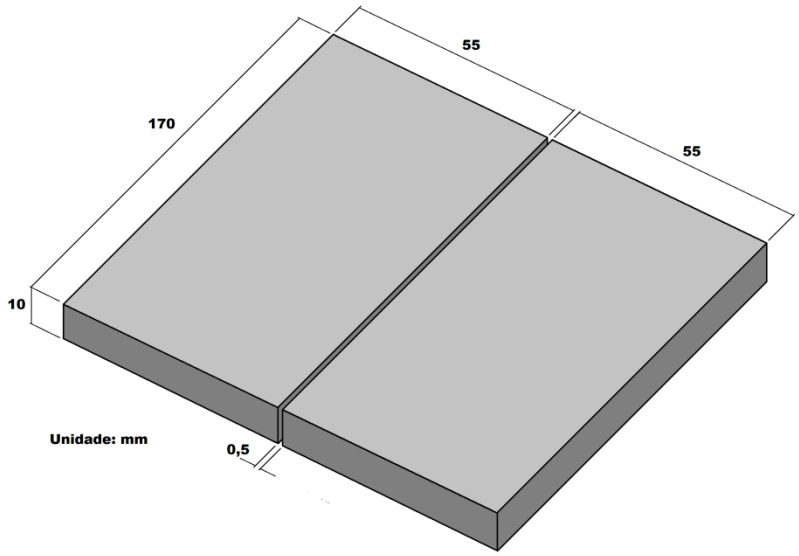


Figura 2.1 - Corpo de prova usado na soldagem com o processo HLAW-GMAW

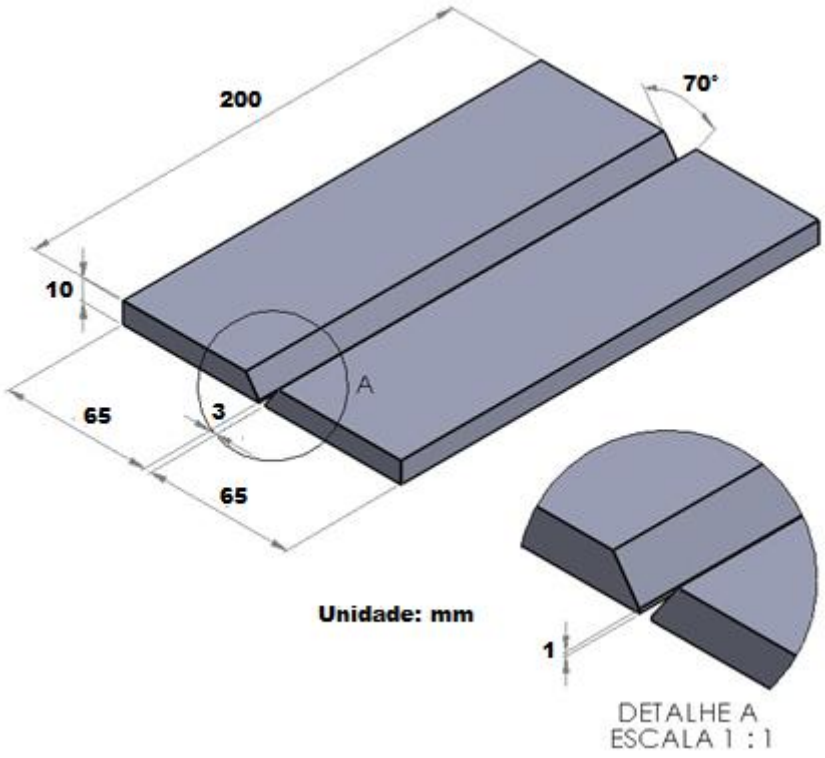


Figura 2.2 - Corpo de prova usado na soldagem com o processo GMAW

2.2. Gás de Proteção

O gás de proteção utilizado tanto no processo de soldagem HLAW-GMAW como no processo de soldagem GMAW, foi uma mistura binária de Argônio (Ar) com 20% de Dióxido de Carbono (CO_2).

2.3. Soldagem

2.3.1. Processo GMAW

Foi utilizado o processo de soldagem GMAW em uma célula composta por um robô industrial com mecanismo de seis eixos, articulação cinemática e carga útil de 20 Kgf. A fonte de soldagem era do tipo inversora, multiprocesso e com capacidade máxima de 400 A. A mesa do posicionador, integrada ao sistema do robô, com capacidade de 300 Kgf e articulação vertical/horizontal/giratória.

As chapas de teste (Figura 2.2) foram soldadas na posição plana com a técnica multipasse, utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Parâmetros de Soldagem utilizados no Processo GMAW

Parâmetros	Unidade	Passes de Enchimento e Acabamento	Passe de Raiz
Corrente de Soldagem	A	133,9	147,7
Velocidade do Arame	m/min	5,44	5,40
Tensão do Arco	V	19,1	18,8
Inclinação da tocha	Grau	15^o	15^o
Velocidade de Soldagem	cm/min	18	24
Distância Bico de Contato e Peça	mm	15	13
Vazão Gás Proteção	ℓ/min	15	15
Energia de Soldagem	kJ/mm	0,882	0,694

A Figura 2.3 mostra a sequência dos cordões no preenchimento da junta soldada com o processo GMAW.

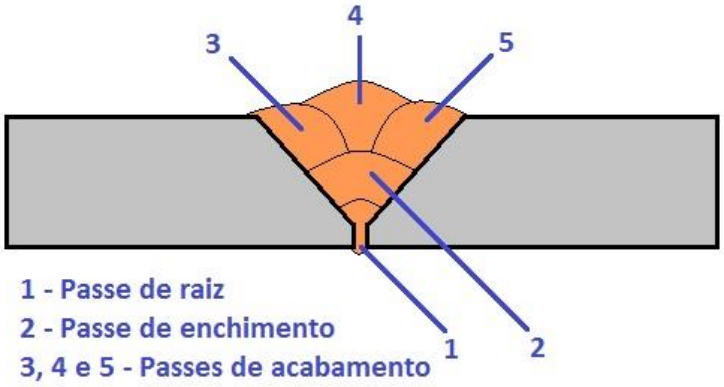


Figura 2.3 - Sequência dos cordões no preenchimento da junta soldada com processo GMAW

2.3.2. Processo HLAW- GMAW

A soldagem HLAW-GMAW foi realizada numa célula dedicada composta por:

- Uma fonte LASER de disco Yb:YAG com potência máxima de 16 kW, comprimento de onda de 1030 nm, qualidade do feixe entre 2 a 8 mm.mrad e diâmetro do feixe LASER = 0,4mm;

- Um robô industrial com mecanismo de seis graus de liberdade com articulação cinemática e carga útil de 60 Kgf;

- Uma mesa com posicionador integrado ao sistema do robô com capacidade de 400 Kgf e articulação vertical/horizontal/giratória.

- Uma fonte inversora de soldagem GMAW com capacidade máxima de 400 A;

- Um cabeçote híbrido HLAW-GMAW

Os parâmetros de soldagem utilizados na soldagem híbrida das chapas de teste foram obtidos a partir de um experimento preliminar, no qual os parâmetros iniciais obtidos de testes anteriores e recomendações da literatura, foram ajustados para produzir uma junta soldada sã. Esse teste preliminar não teve como objetivo a

otimização dos parâmetros de soldagem, pois essa seria uma etapa bem mais complexa e extensa. Nesse caso, a parametrização ocorreu em duas etapas: na primeira etapa os processos foram ajustados individualmente, com a técnica cordão sobre chapa. O processo LASER foi regulado para ficar na iminência da penetração total e o processo GMAW foi ajustado com a mesma velocidade de soldagem do LASER, de modo a produzir um cordão de solda com transferência suave e com bom acabamento. Na segunda etapa, realizou-se a soldagem híbrida, mas limitou-se o ajuste aos seguintes parâmetros: abertura da junta, tensão e corrente do arco elétrico.

Após o teste preliminar, obteve-se um conjunto de parâmetros para o processo HLAW-GMAW, apresentados na Tabela 2.3, que produziu uma junta sã. A junta soldada foi submetida ao ensaio para medição das tensões residuais antes de ser dividida em duas partes iguais. Uma das partes foi analisada na condição como soldada com o cordão de solda híbrido, enquanto que a outra metade recebeu um passe de acabamento com o processo GMAW visando permitir uma avaliação do efeito do ciclo térmico produzido pelo passe de acabamento sobre às propriedades da junta soldada. As figuras 2.4 e 2.5 mostram, respectivamente, o desenho esquemático das seções transversais das duas condições: Com o Cordão de Acabamento (CCA) e Sem o Cordão de Acabamento (SCA).

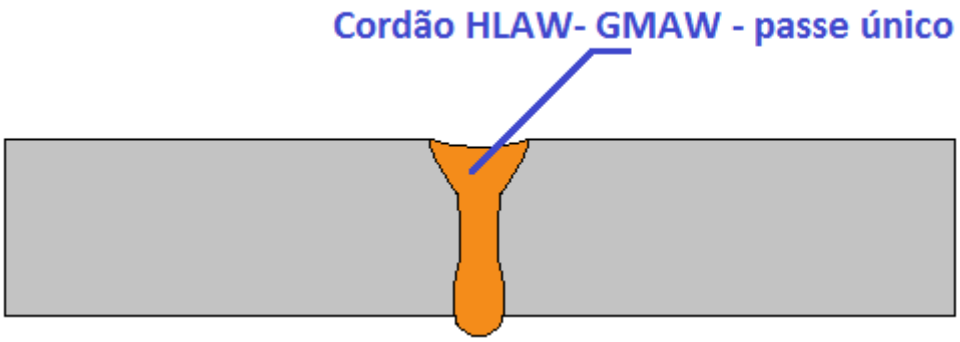


Figura 2.4 – Desenho esquemático da junta soldada HLAW-GMAW em passe único

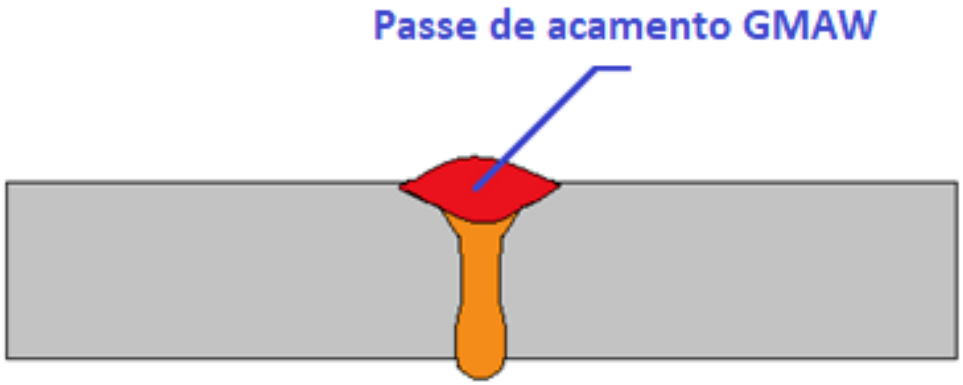


Figura 2.5 – Desenho esquemático da junta HLAW-GMAW com passe de acabamento pelo processo GMAW

A Tabela 2.4 apresenta os parâmetros utilizados no passe de acabamento realizado com o processo GMAW.

Tabela 2.3 – Parâmetros de Soldagem utilizados no processo HLAW-GMAW

Parâmetros	Unidade	
Potência LASER	W	7.265
Corrente de Soldagem	A	194
Tensão de Arco	V	26,8
Velocidade do arame	m/min	11,6
Inclinação do cabeçote	grau	15^{o}
Velocidade de Soldagem	cm/min	174
Distância Laser – arco elétrico	mm	0 (zero)
Vazão Gás Proteção	ℓ/min	18
Energia de Soldagem	kJ/mm	0,429

Tabela 2.4 – Parâmetros de soldagem utilizados no cordão de acabamento com o processo GMAW

Parâmetros	Unidade	Passe de Acabamento
Corrente de Soldagem	A	133,9
Velocidade do Arame	m/min	5,44
Tensão do Arco	V	19,1
Inclinação da tocha	Grau	15^{o}
Velocidade de Soldagem	cm/min	18
Distância Bico de Contato e Peça	mm	15
Vazão Gás Proteção	ℓ/min	15
Energia de Soldagem	kJ/mm	0,882

2.4. Análise Química

Foi realizada análise química do metal de base e do metal de solda por meio de espectrometria de emissão óptica. O equipamento utilizado foi um espectrômetro da marca Oxford modelo Foundry Master Pro.

2.5. Ensaios Mecânicos

2.5.1. Ensaios de Microdureza

Realizou-se um mapeamento de microdureza da seção transversal na região da solda (metal de base, ZTA e metal de solda), nas três juntas soldadas:

i) Junta soldada com o processo HLAW-GMAW;
ii) Junta soldada com o processo HLAW-GMAW e com passe de acabamento GMAW e;
iii) Junta soldada com o processo GMAW.

Os ensaios de microdureza Vickers foram efetuados com carga de 0,2 kgf, com espaçamento entre as identações de 0,3 mm O número de leituras nas três juntas variou entre 1.030 e 2.546 pontos. O equipamento utilizado foi um durômetro automático Shimadzu HMV-G.

2.5.2. Ensaios de Impacto Charpy-V

O ensaio de impacto Charpy-V foi realizado em um equipamento de 300 J a temperatura ambiente (23°C) em corpos de prova de dimensões 5,0mm x 10mm x 55mm, de acordo com a norma ASTM E 23, tipo A [41], retirados transversalmente ao cordão de solda, sendo o eixo do entalhe perpendicular à face da solda. Foram produzidos 5 corpos de prova para as chapas soldadas com processo HLAW-GMAW (sem passe de acabamento e com passe de acabamento), GMAW e 5 corpos de prova do metal base. Os detalhamentos dos corpos de prova retirados nas juntas soldadas estão mostrados nas Figuras 2.6, 2.7 e 2.8.

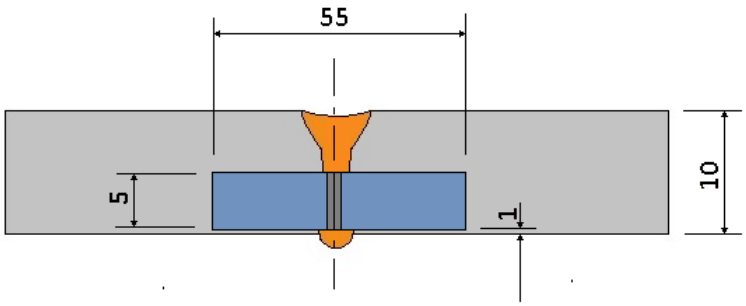


Figura 2.6 – Desenho esquemático mostrando a posição de retirada do corpo de prova Charpy-V da junta HLAW-GMAW. Cotas em mm

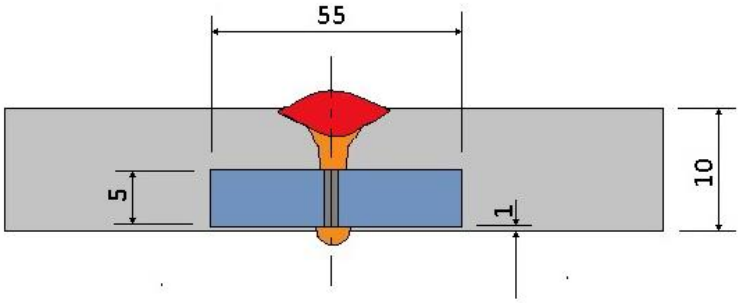


Figura 2.7 – Desenho esquemático mostrando a posição de retirada do corpo de prova Charpy-V da junta HLAW-GMAW com passe de enchimento GMAW. Cotas em mm

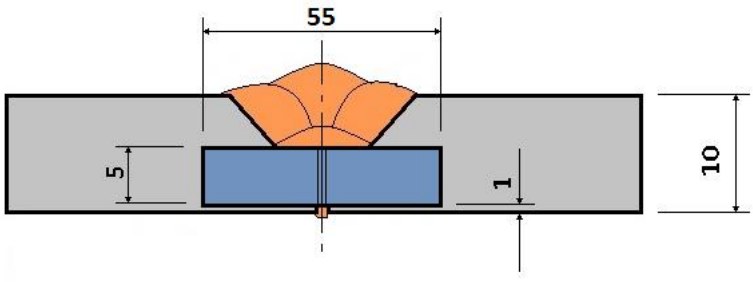


Figura 2.8 – Desenho esquemático mostrando a posição de retirada do corpo de prova Charpy-V da junta GMAW. Cotas em mm

2.6. Ensaio para Medição de Tensões Residuais

As tensões residuais foram medidas e analisadas no Laboratório de Análises de Tensões - LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF – Universidade Federal Fluminense, pela técnica da difração por raios-X utilizando o método $sen^2\Psi$. Foi utilizado o analisador Stressrad, fabricado pela empresa Radicon Ltd., utilizando radiação CrKα ($\lambda Cr K\alpha$ = 2,291 Å), difratando o plano (211) da ferrita, com ângulo de 2θ = 156,41^o.

Foram realizadas leituras sob cinco ângulos de inclinação (Ψ) em cada ponto. O software apresenta, para cada ponto medido, um gráfico com 5 leituras que relacionam a distância interplanar (d) com ângulo de inclinação (ψ). A tensão residual no ponto é a média das cinco leituras e as margens de erro são calculadas em relação à linha de tendência.

2.7. Ensaios Metalográficos

Foi realizada a análise metalográfica dos metais de solda, da zona termicamente afetada e do metal de base, consistindo de macrografia, microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A preparação das amostras consistiu da técnica convencional de lixamento com lixas de granulometria 100, 220, 320, 400, 500, 600 e 1200 seguido de polimento com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm. Após o polimento realizou-se o ataque químico com reagente nital 2% para macrografia e micrografia.

Foi realizada análise quantitativa dos percentuais de ferrita acicular na região a frente do entalhe no corpo de prova do ensaio de impacto Charpy-V. Para cada junta foram analisadas 10 regiões usando-se uma grade de pontos 9 x 9. O posicionamento na junta foi no centro da solda, variando aleatoriamente da raiz até a cota de 5 mm.

Para a análise por microscopia óptica, foi utilizado um microscópio ótico OLYMPUS modelo BX-60M.

Realizou-se uma análise adicional por microscopia eletrônica de varredura (MEV), para uma caracterização mais detalhada das microfases presentes. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi da marca Cambridge Instruments, modelo CanScan 3200 LV.

Capítulo 3 - Resultados

3.1 Soldagem

A Figura 3.1 apresenta o aspecto visual da raiz das duas juntas soldadas. Desconsiderando as áreas normais de descarte, ambas as juntas soldadas apresentaram aspecto homogêneo e sem descontinuidades detectáveis visualmente, tanto na face quanto na raiz.

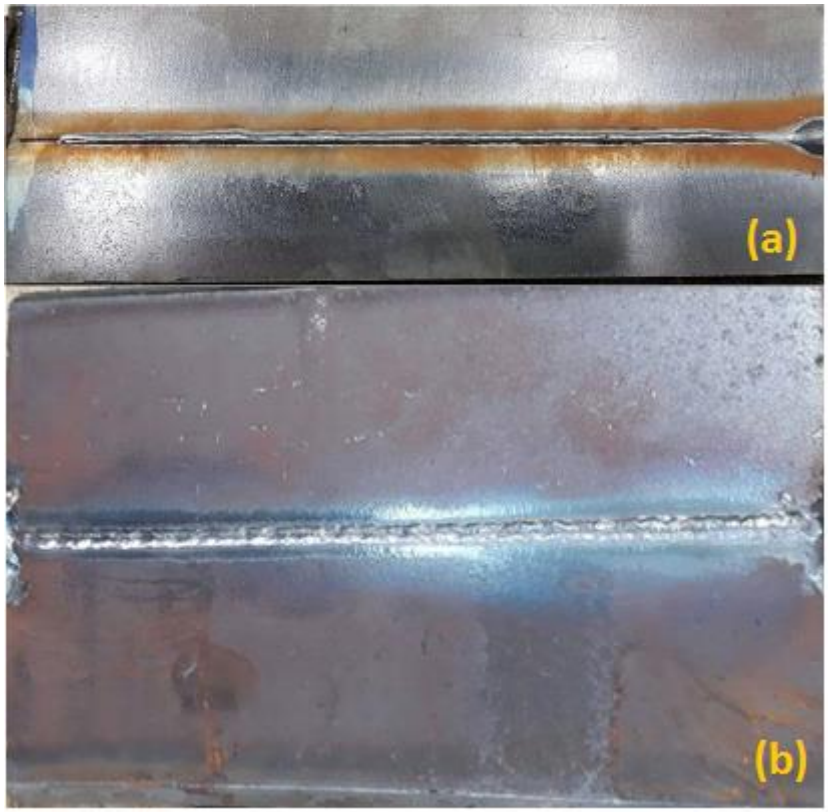


Figura 3.1 - Aspecto visual da raiz das juntas soldadas com os processos (a) HLAW-GMAW e (b) GMAW

3.2 Análise Química

A Tabela 3.1 apresenta o resultado da análise química e da mensuração da diluição efetuada nos corpos de prova extraídos das juntas soldadas. Na junta híbrida, a análise química foi realizada antes e após a deposição do passe de acabamento com o processo GMAW. Nessa análise é importante observar os teores baixos de Mn e Si no metal de base, que aumentam conforme ocorre maior participação do metal de adição, na junta híbrida sem cordão de acabamento (SCA), com cordão de acabamento (CCA) e na junta GMAW robotizada, nessa ordem.

Tabela 3.1 - Análise química das juntas soldadas e diluição







Metal de Solda	Posição	%C	%Mn	%Si	%P	%S	Diluição
Híbrido	(1) Raiz	0,16	0,45	0,07	0,0149	0,0136	71%
	(2) Topo (SCA)	0,15	0,55	0,10	0,0128	0,0141	
Híbrido+GMAW	(3) Acabamento. (CCA)	0,19	0,55	0,12	0,0060	0,0082	47%
GMAW	(4) Raiz	0,07	1,44	1,01	0,0128	0,0120	15%
	(5) Topo	0,06	1,55	0,99	0,0106	0,0117	
Metal Base		0,18	0,43	0,03	0,0137	0,0130	
Metal de Adição		0,08	1,45	0,95	0,011	0,0130	

3.3 Medição de Tensões Residuais

A Tabela 3.2 apresenta os resultados da medição das tensões residuais nas juntas soldadas, na qual se observa que tanto no metal de solda quanto na ZTA, os valores da junta GMAW são superiores aos valores da soldagem HLAW-GMAW.

Tabela 3.2 - Tensões residuais medidas nas juntas soldadas

Posição	GMAW (MPa)		HÍbrido LASER-GMAW (MPa)	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
MS	245 ±18	39 ±3	169 ±15	-40 ±14
ZTA	146 ±7	65 ±1	104 ±7	-162 ±9

3.4 Ensaios Mecânicos

3.4.1 Microdureza

As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam o mapeamento de microdureza das juntas soldadas HLAW-GMAW sem o cordão de acabamento, HLAW-GMAW com o cordão de acabamento e GMAW, respectivamente. Nessas figuras foi utilizada um padrão de cores em escalas para facilitar a visualização da distribuição dos pontos de dureza na região de interesse.

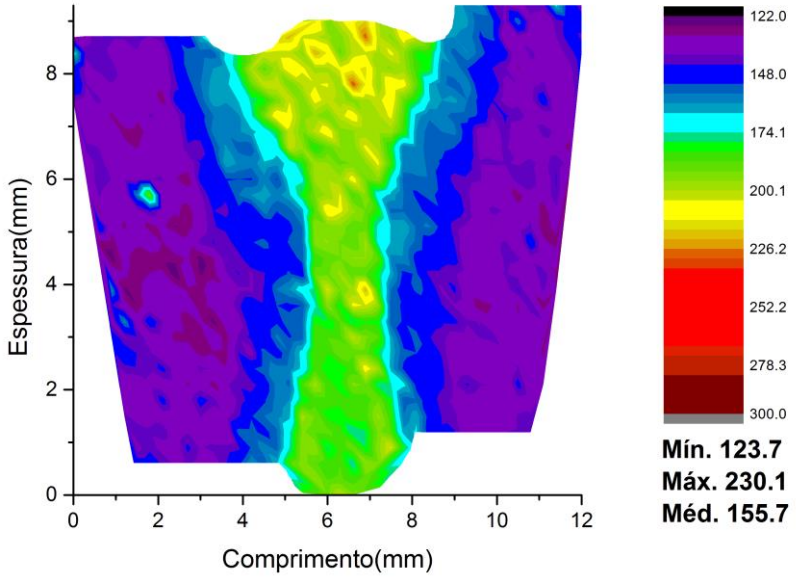


Figura 3.2 - Mapeamento de microdureza da junta soldada HLAW-GMAW sem cordão de acabamento

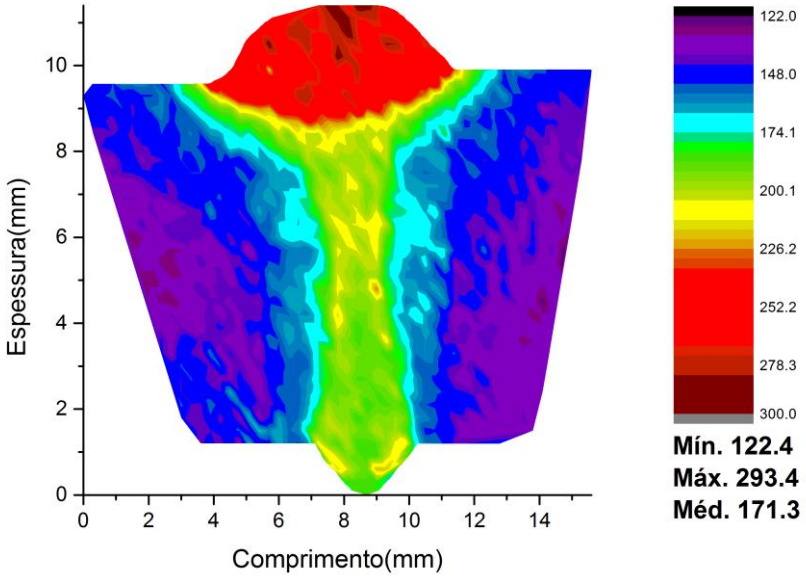


Figura 3.3 - Mapeamento de microdureza da junta soldada HLAW-GMAW com cordão de acabamento

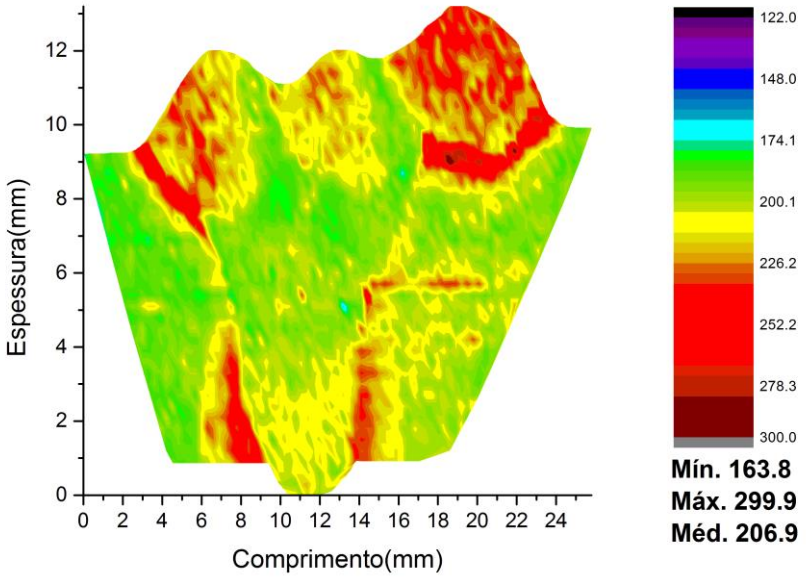


Figura 3.4 - Mapeamento de microdureza da junta soldada GMAW

Nas Figuras 3.5 e 3.6 realizou-se uma comparação entre os perfis de dureza transversais (a 5,0 mm da raiz da solda) e ao longo da espessura, das duas amostras de solda HLAW-GMAW, com e sem o cordão de solda de acabamento e a amostra da solda GMAW.

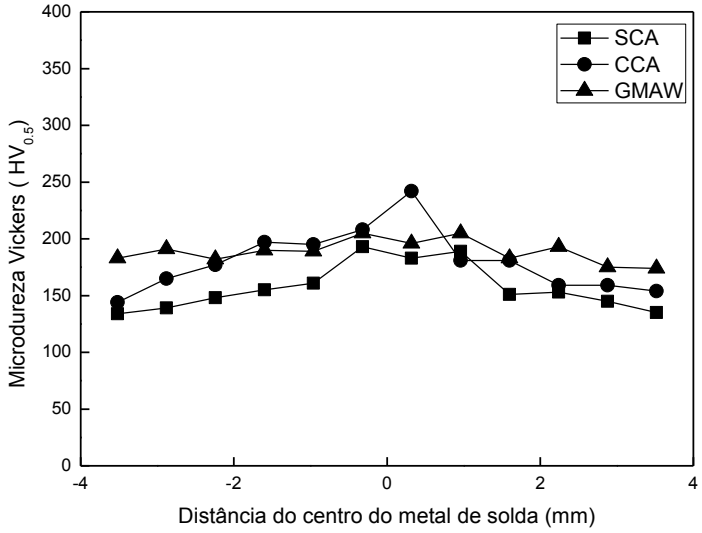


Figura 3.5 - Comparação entre os perfis transversais de microdureza das juntas soldadas híbridas a 5,0mm da raiz, com (CCA) e sem (SSA) o cordão de acabamento, e da junta soldada GMAW

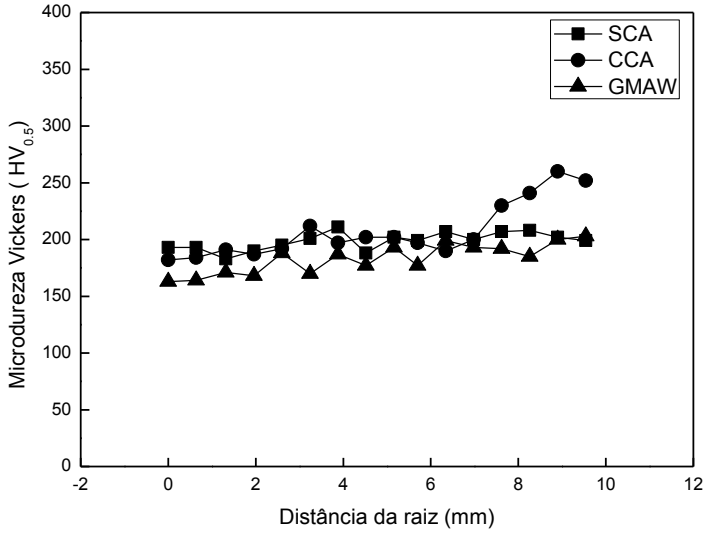


Figura 3.6 - Comparação entre os perfis de microdureza das juntas soldadas híbridas ao longo da espessura, com (CCA) e sem (SCA) o cordão de acabamento e da junta soldada GMAW

3.4.2 Ensaio de Impacto Charpy-V

O resultado de cada conjunto de cinco corpos de prova das soldas HLAW-GMAW (com e sem cordão de acabamento) e GMAW está apresentado na Tabela 3.3 e na Figura 3.7.

Tabela 3.3 - Resultado do Ensaio de Impacto Charpy a temperatura ambiente (23°C)
SCA = Sem Cordão de Acabamento / CCA = Com Cordão de Acabamento

Ensaio de Impacto - Energia Absorvida (J)				
CP	MS Híbrido		MS GMAW.	Metal Base
	SCA	CCA		
1	47,5	47,5	80,5	39,0
2	83,5	64,0	78,5	38,0
3	61,0	60,0	81,0	36,0
4	68,0	67,5	62,5	37,0
5	70,5	73,0	62,5	37,5
Média	66,1	62,4	73,0	37,5

Destaca-se na Tabela 3.3 o fato da energia absorvida pelo metal de base ser bem inferior ao das soldas, tanto na soldagem HLAW-GMAW quanto na soldagem GMAW. Ambas as soldas híbridas apresentaram resultados muito próximos, o que parece indicar que o passe de acabamento não provocou modificação significativa na região testada. Observa-se também que os resultados da solda híbrida são compatíveis com os resultados da solda GMAW.

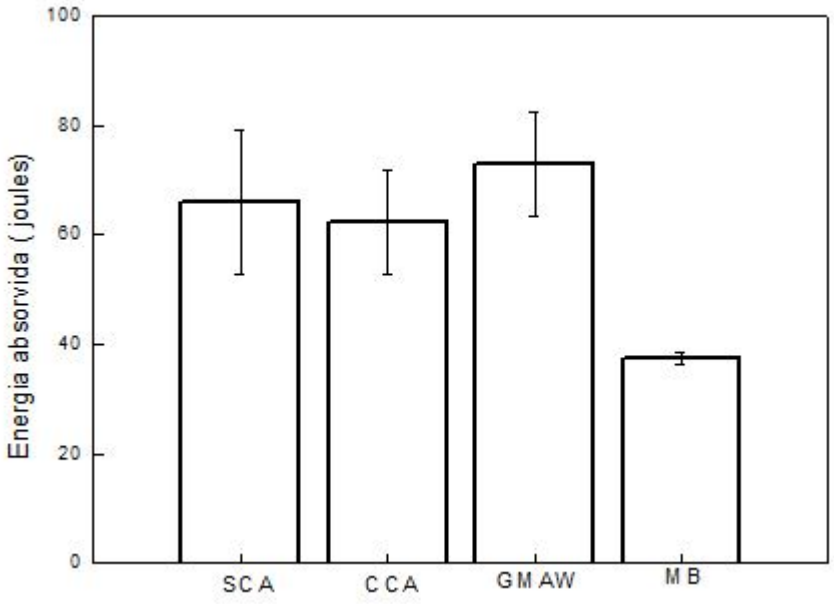


Figura 3.7 - Resultado do ensaio de impacto realizado no metal de solda

3.5 Análise Metalográfica

3.5.1 Macrografia

As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10, apresentam as macrografias das juntas soldadas, onde é possível observar que a soldagem com o processo GMAW produziu uma deformação angular perceptível enquanto que na junta HLAW-GMAW, independente do passe de acabamento, a deformação angular não se mostrou significativa.

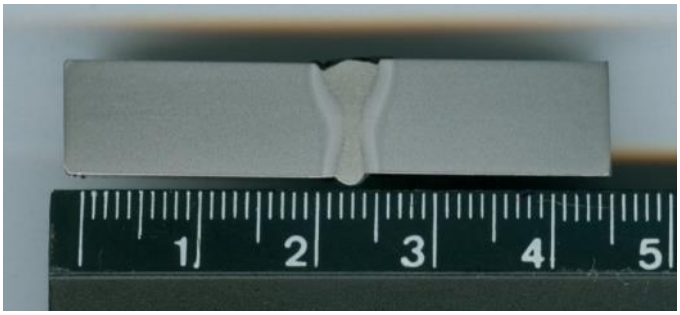


Figura 3.8 - Macrografia da junta soldada híbrida LASER-GMAW sem o cordão de acabamento

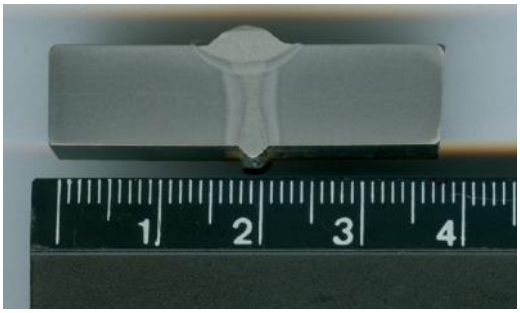


Figura 3.9 - Macrografia da junta soldada HLAW-GMAW com o cordão de acabamento efetuado com o processo GMAW

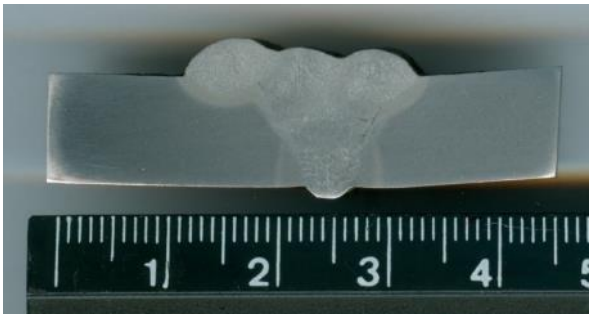


Figura 3.10 - Macrografia da junta soldada GMAW

Na macrografia da solda HLAW-GMAW sem cordão de acabamento da Figura 3.8 observa-se que o passe híbrido único penetra a raiz da junta adequadamente e preenche praticamente toda a espessura. A ZTA não é tão estreita, como é típico do processo LBW, entretanto não há deformação angular significativa nessa junta soldada. Na junta soldada com o processo GMAW da Figura 3.10, por outro lado, a deformação angular é bem evidente. A Figura 3.9 mostra a solda HLAW-GMAW com o cordão de acabamento. Nessa macrografia é possível identificar a região da solda híbrida que teve sua estrutura modificada pelo ciclo térmico adicional do passe de acabamento.

3.5.2 Microscopia Óptica (MO)

A Figura 3.11 mostra a microestrutura dos metais de solda da junta híbrida com e sem passe de acabamento. Nessas micrografias é possível observar que a estrutura original da solda híbrida é colunar, grosseira e com uma razão de aspecto elevada. O passe de acabamento produziu um efeito de refinamento dessa estrutura original até o

meio da espessura, posição a partir da qual ambos os metais de solda apresentam comportamento similar. No caso do processo GMAW, a estrutura é mais refinada que a da solda híbrida, além do benefício produzido pelo ciclo térmico do passe posterior sobre o passe anterior, regenerando parte da microestrutura deste.

A Tabela 3.4 apresenta os percentuais de ferrita acicular obtidos na região do entalhe no corpo de prova de impacto Charpy-V (centro do metal de solda). Observa-se que o maior percentual de ferrita acicular foi encontrado na solda GMAW com quase o dobro do teor medido na solda híbrida com maior percentual (sem o cordão de acabamento).

Tabela 3.4 - Percentual de ferrita acicular nos metais de solda

Junta Soldada	% de Ferrita Acicular
Híbrida LASER-GMAW SCA	9,6%
Híbrida LASER-GMAW CCA	6,9%
GMAW Robotizada	19,3%

SCA = Sem Cordão de Acabamento / CCA = Com Cordão de Acabamento

A Figura 3.12 mostra a microestrutura da ZTA das juntas soldadas, onde se nota a ocorrência de bainita, ferrita e perlita nesta região em substituição a estrutura ferrita e perlita do metal base.

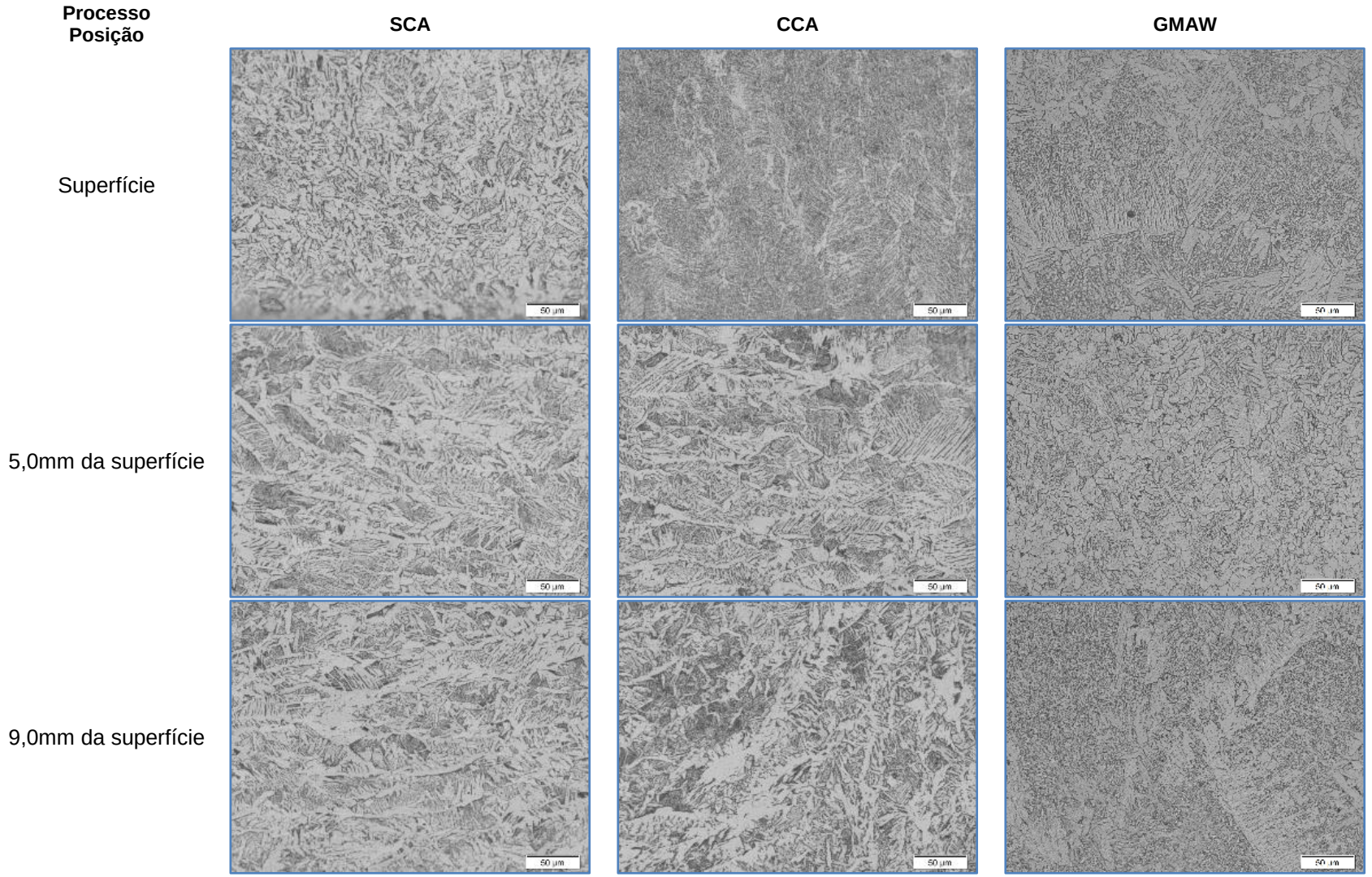


Figura 3.11 - Microestrutura dos metais de solda (MO). Ataque: Nital 2%

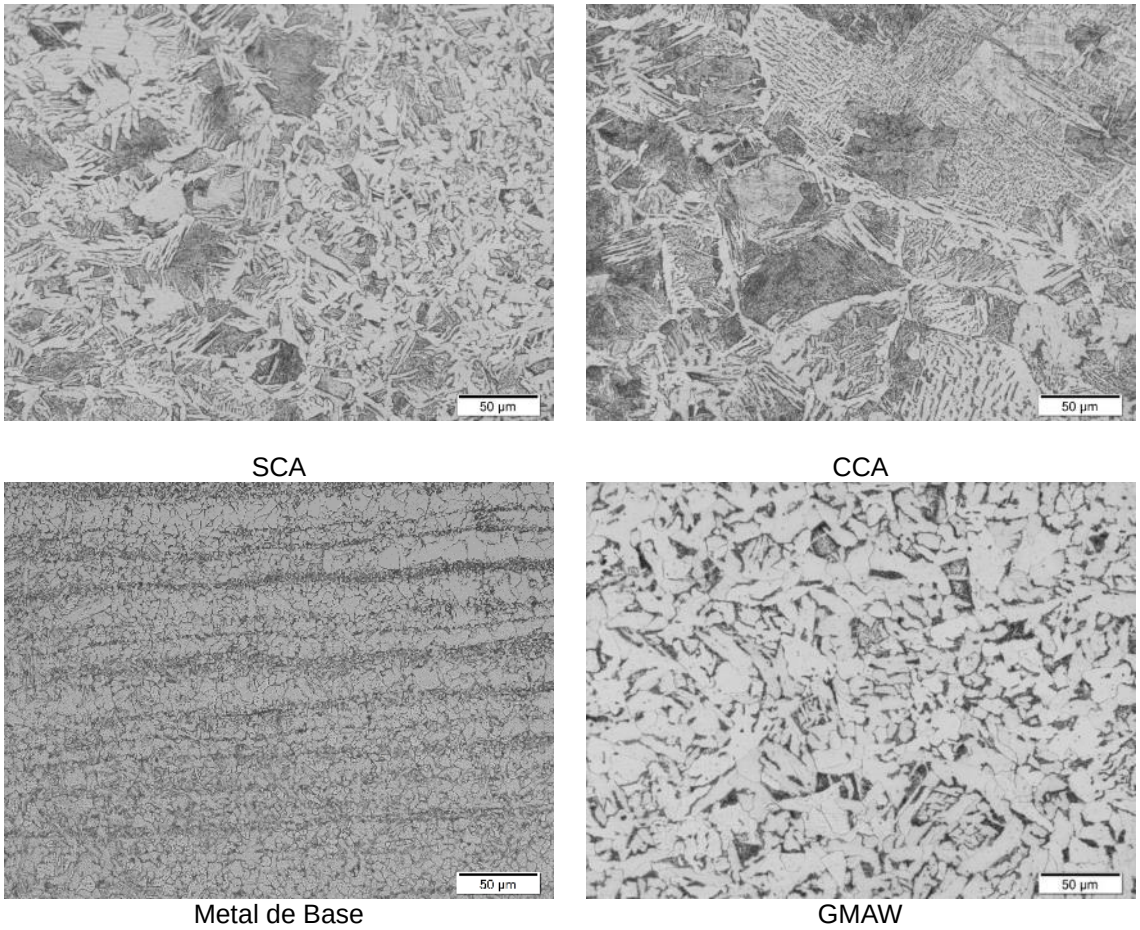
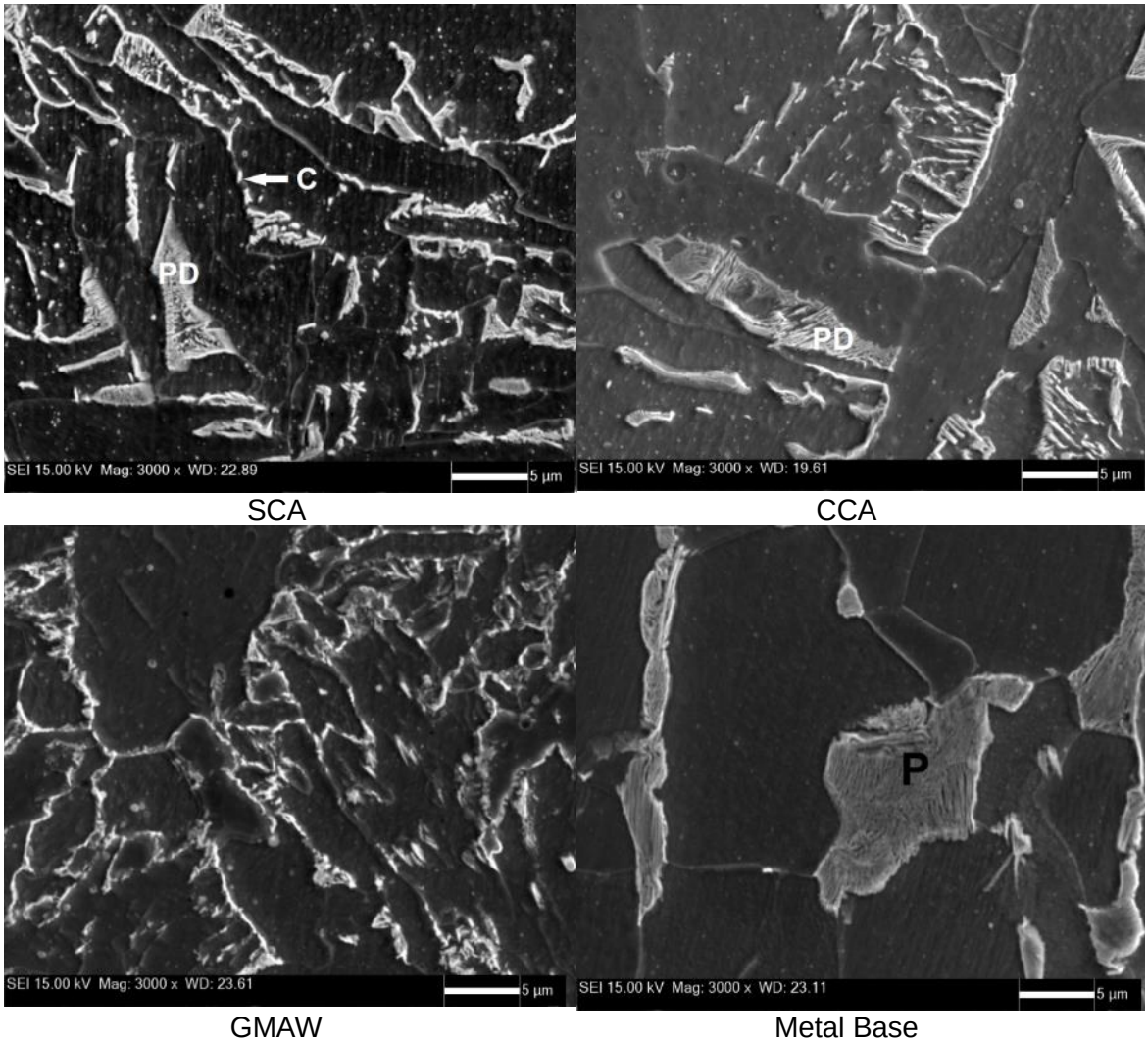


Figura 3.12 - Microestrutura da região central da ZTA das juntas soldadas (MO). Ataque: Nital 2%

3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 3.13 apresenta o aspecto das microfases na região central dos metais de solda, onde se observa a presença de perlita degenerada (PD) e carbonetos nos metais de solda obtidos com as juntas híbridas. Para a junta GMAW, foi observada a presença de carbonetos (C), provavelmente atribuída aos reaquecimentos dos passes posteriores.



SCA CCA

GMAW Metal Base

Figura 3.13 - Aspecto das microfases da região central do metal de solda (5,0mm da superfície) e no metal base (MEV). Ataque Nital 2%

Capítulo 4 - Discussão

4.1 Efeito do Ciclo Térmico de Soldagem

Diversos autores [5-18,22-28, 31-34,36,39] destacam que a soldagem com o processo de soldagem HLAW-GMAW é relativamente complexa, em função do número de parâmetros de soldagem envolvidos. Por outro lado, o processo híbrido traz como um de seus principais atributos a robustez, ou seja, ser menos sensível as questões da preparação de junta, principalmente quando comparado com o processo LBW. Os testes preliminares confirmaram que há um grande número de parâmetros e condições de soldagem que impactam no resultado final. Portanto, ao invés de buscar a otimização de todo o conjunto de parâmetros de soldagem, optou-se por fixar a maior parte destes, em valores médios recomendados pela literatura [5,15-16, 24, 40], e ajustar os parâmetros de arco elétrico (corrente e tensão) e a abertura da junta. Desse modo, foi possível obter uma junta soldada sã, visando a determinação de suas propriedades mecânicas, além de avaliar o desempenho do processo.

Nesse contexto, apesar de não estar no escopo do trabalho a otimização dos parâmetros de soldagem, alguns comentários sobre o ajuste de parâmetros são pertinentes, em função de se tratar de um processo de soldagem sem histórico no Brasil e na América do Sul. Cabe ressaltar que apesar de estarem descritos na literatura, boa parte dos efeitos observados a seguir, ainda não estão totalmente esclarecidos ou apresentam explicação restrita às condições experimentais nas quais foram observados originalmente [5,10-11, 23-24, 26, 28].

O primeiro aspecto que merece ser destacado foi a interação entre os parâmetros dos dois processos, como observado no trabalho original de Steen [10]. De fato, os parâmetros dos dois processos foram ajustados individualmente, na condição cordão sobre chapa, com a potência e a velocidade de deslocamento do LASER no limiar da penetração total da espessura da chapa e o arco elétrico do processo GMAW regulado para a obtenção de um cordão de acabamento suave. Entretanto, observou-se na soldagem híbrida a formação de uma junta soldada com penetração excessiva, acabamento irregular e uma quantidade significativa de respingos. A interação entre o LASER e o arco elétrico é complexa e depende de um grande número de parâmetros [23,28]. Portanto, a opção foi por reduzir progressivamente a energia do processo GMAW, visando produzir uma junta soldada

com penetração homogênea e aspecto visual aceitável. Conforme Gao et al. [4] a corrente elétrica do arco produz uma pressão sobre a poça de fusão que direciona parte do calor da região do arco elétrico para a raiz da solda híbrida, modificando o perfil do cordão. Assim, com uma redução de 7% dos parâmetros de arco elétrico (tensão e corrente) selecionados inicialmente, chegou-se ao conjunto de parâmetros que permitiu a soldagem da chapa de teste.

O segundo aspecto a ser destacado nessa etapa de ajuste de parâmetros de soldagem foi a formação de descontinuidades do tipo "hump" na raiz da solda, como descrito na literatura [28-29]. Essas descontinuidades persistiram ocorrendo pontualmente, mesmo após o ajuste dos parâmetros de soldagem como descrito no parágrafo anterior. A proposta inicial era de realizar a soldagem com chanfro reto e sem abertura na raiz. Entretanto, após várias tentativas de eliminar a formação localizada dos “humps”, foi observado que essas descontinuidades se formavam exatamente onde havia pequenas falhas no ajuste da junta (que não era usinada). Essa instabilidade só foi eliminada quando se adotou uma abertura na raiz da junta de 0,5mm. A abordagem de Blecher et al [28] para a eliminação dos “humps” foi efetiva na etapa anterior, quando a formação do “hump” era ao longo de toda a raiz da solda, mas não no caso da ocorrência localizada. A introdução da abertura na junta foi a solução efetiva, uma vez que a proposta não era trabalhar com preparação usinada. Naturalmente que esse aspecto não foi explorado de forma aprofundada, mas ficou evidente que o processo possui maior tolerância em termos de uma pequena variação na abertura da junta, quando essa abertura de fato existe, ou seja, não é zero.

Outra observação relevante realizada durante o trabalho de ajuste de parâmetros, foi com relação a inclinação do cabeçote LASER. Praticamente todos os experimentos encontrados na literatura utilizam o cabeçote LASER perpendicular ao plano que contém o metal de base. Cosalino et al [13] fazem referência a inclinação do cabeçote LASER quando o material a soldar possui alta reflexibilidade (alumínio, cobre e ligas destes), pois nesse caso o feixe pode ser refletido de volta para o cabeçote e provocar um sério dano na fibra ótica. O equipamento utilizado no desenvolvimento do presente trabalho experimental possui um ângulo fixo de 30º entre o cabeçote LASER e a tocha GMAW. Durante os testes preliminares para definir os parâmetros de soldagem, foi testada uma condição com o cabeçote LASER inclinado, de modo que este ficou com um ângulo de 15º em relação a normal ao corpo de prova, assim como a tocha GMAW (Figura 4.1) com 15°. Foi observado empiricamente que com a

inclinação do cabeçote ocorreu maior estabilidade na transferência metálica e menor incidência de projeções (respingos), por essa razão essa condição foi mantida no experimento. Provavelmente essa maior estabilidade na transferência metálica deve estar relacionada com a forma de interação entre os plasmas induzidos pelos dois processos, como sugere Li et al. [27] na avaliação de fenômeno similar.[11-19].

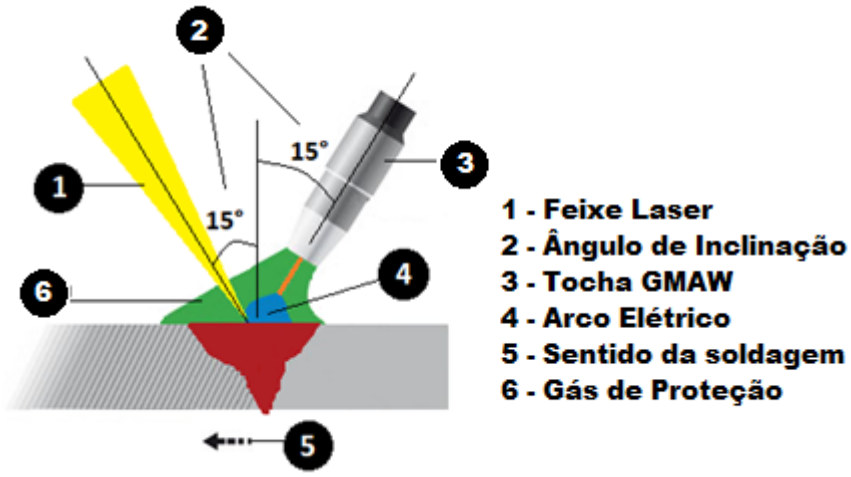


Figura 4.1 – Desenho esquemático do cabeçote de soldagem HLAW-GMAW com os ângulos de inclinação do Feixe Laser e Tocha GMAW

Em termos de desempenho do processo, a soldagem HLAW-GMAW propiciou a execução do passe de raiz e enchimento em passe único e com alta velocidade de soldagem. A Tabela 4.1 apresenta os tempos de soldagem e o consumo de arame-eletrodo em cada um dos passes, tanto da soldagem HLAW-GMAW como na solda GMAW. Observa-se que a redução no tempo de arco aberto do processo híbrido para o GMAW foi de 75,5%, o que representa ganho de produtividade e redução direta de custo devido à redução no consumo de gás de proteção e energia elétrica. É importante destacar que nessa avaliação não foi considerado o tempo de reposicionamento e limpeza entre passes, que certamente iria aumentar ainda mais o ganho percentual da soldagem híbrida sobre a soldagem GMAW, uma vez que uma chapa foi soldada com dois passes e a outra com cinco passes, respectivamente.

A redução de consumo de arame-eletrodo foi de 72,9%, o que representa redução de custo direto. Nessa análise é importante incluir também a redução de tempo e de custo para a preparação do chanfro na soldagem GMAW, que não é necessário na soldagem HLAW-GMAW. Outro benefício que não é fácil quantificar diretamente, mas que é muito importante numa avaliação comparativa, é a redução da

deformação produzida pela operação de soldagem, como ficou evidente nas macrografias (Figuras 3.2 a 3.4).

Tabela 4.1 - Comparação entre o tempo de soldagem e consumo de arame-eletrodo entre os processos de soldagem HLAW-GMAW x GMAW

Processo	HLAW-GMAW		GMAW		% Redução
Passe	Raiz/Ench. (1 passe)	Acab. (1 passe)	Raiz e Ref. (2 passes)	Acab. (3 passes)	
Tempo Soldagem(s)*	6,9	66,7	50	66,7	
Tempo Total (s)*	73,6		300,1		75,5
Consumo de arame (g)	8,2	37,0	55,9	111,1	
Consumo Total (g)	45,2		167,0		72,9

(*) Tempo de arco aberto

A energia de soldagem do processo HLAW-GMAW apresentada na Tabela 2.3 foi de 0,429 kJ/mm, sendo 0,250 kJ/mm referente ao processo LBW e 0,179 kJ/mm referente ao processo GMAW. Essa energia de soldagem é relativamente baixa considerando que foi empregada para fundir uma espessura de praticamente 8,5mm de material e que no passe de acabamento com o processo GMAW a energia empregada foi de 0,882 kJ/mm. Na chapa de teste soldada com o processo GMAW foram cinco passes com a média da energia de soldagem de 0,844 kJ/mm. Outros trabalhos corroboram essa avaliação: no experimento de Gao [4], foi utilizada energia de soldagem entre 0,796 e 0,546 kJ/mm para a soldagem em passe único de junta de aço C-Mn com 6mm de espessura. Zhang et al [15] usaram energia de soldagem de 0,121 kJ/mm (LASER de 3 kW) para a soldagem do passe de raiz em uma chapa de aço C-Mn de 40mm de espessura, com chanfro estreito. Nessa chapa foram utilizados nove passes de solda híbrida para preencher completamente a junta, os passes de enchimento e acabamento foram com energia de soldagem de 0,980 kJ/mm. O projeto Hyblas [16] determinou uma janela operacional para soldar chapa de aço estrutural de 15mm de espessura com energia de soldagem variando de 0,96 kJ/mm (LASER de 14,2 kW) a 1,1 kJ/mm (LASER de 10,6 kW).

A partir da energia de soldagem do processo HLAW-GMAW é possível estimar o intervalo $\Delta t_{8/5}$ usando a equação de Rosenthal modificada, e chegar ao valor de 1,8s. Moore *et al*. [29], soldaram uma chapa de 12mm de espessura, com energia de soldagem de 0,563 kJ/mm e obtiveram um $\Delta t_{8/5}$ de 2,9s. Utilizando a mesma equação

para estimar o intervalo $\Delta t_{8/5}$ do experimento de Moore, o valor obtido é de 2,2s, diferença que pode ser atribuída aos ajustes da equação utilizada.

A diluição da soldagem HLAW-GMAW em passe único foi de 71% e a do passe de acabamento GMAW foi de 47% (Tabela 3.1). Esses valores são compatíveis com os obtidos por Karlsson et al., que compararam o efeito da diluição do processo HLAW-GMAW com outros cinco processos diferentes, para a soldagem de aços de alta resistência de 12 mm de espessura. Nesse trabalho, a soldagem com o processo híbrido foi realizada em passe único e proporcionou diluições de 73% para o Weldox 700 (EN 10025) e de 71% para o Weldox 1100 (EN 10025).

A avaliação dos resultados da Tabela 3.1, que mostra a análise química dos metais de solda, permite observar que tanto na soldagem HLAW-GMAW como na solda GMAW, o efeito de diluição é maior na região da raiz que no topo da solda. Na solda GMAW esse efeito é esperado, uma vez que se trata de uma solda multipasses e no passe de raiz não há substrato para suportar a poça de fusão, além do que a fusão do metal de base é necessária para garantir a qualidade da junta soldada. Nos demais passes, a poça de fusão é suportada pela camada de baixo e o percentual de diluição é naturalmente reduzido. Na solda híbrida, a diferença entre a raiz e o topo do passe único pode ser atribuído ao efeito descrito no trabalho de Gao et al. [4], no qual a relação entre a energia do LASER e do arco (ERLA) é importante para definir a forma do cordão de solda híbrido, sendo que incrementos no valor da corrente de soldagem, assim como o aumento na área da seção transversal do chanfro, promovem um fluxo de calor da região do arco para a região da raiz. Esse fluxo de calor é responsável pela homogeneização da composição química ao longo da espessura da junta soldada. Em casos extremos, como no experimento descrito por Acuña [5] essa diferença é bastante intensa.

As tensões residuais medidas nas chapas soldadas com os processos HLAW-GMAW e GMAW (Tabela 3.2) confirmaram as expectativas de níveis de tensões residuais trativas mais baixos na soldagem HLAW-GMAW, quando comparado com a chapa soldada com o processo GMAW, em função do aporte de calor mais baixo [42]. Na junta soldada pelo processo HLAW-GMAW, as tensões compressivas, que são benéficas, foram mais elevadas do que na junta soldada com o processo GMAW. A deformação angular observada na chapa de teste soldada com o processo GMAW (Figura 3.10) foi produzida pela soldagem sem restrição, que conforme Gonçalves *et*

al. [42], não modifica significativamente o resultado das tensões residuais trativas medidas.

4.2 Propriedades Mecânicas

4.2.1 Mapeamento de Microdureza

O mapeamento de microdureza da amostra soldada com o processo HLAW-GMAW SCA (Figura 3.2) mostra que há um aumento de dureza gradual do metal de base para o metal de solda, e no metal de solda, da raiz para a face do cordão. A faixa de variação observada é de (122,5 HV a 230,5 HV). O valor de dureza máximo é observado próximo ao topo do cordão e não indica a presença de constituintes frágeis. Esse perfil de dureza era esperado, em função do metal de adição apresentar propriedades mecânicas superiores às do metal base. Essas variações de microdureza são perfeitamente compatíveis com a variação de composição química ao longo do metal de solda como discutido no final do item 4.1. Zhang et al. [15] atribuem à região do LASER do passe de raiz as piores propriedades do metal de solda. Esse fato é justificado pela maior taxa de resfriamento nessa região, o que não foi observado nas amostras analisadas. Pode-se sugerir que esta diferença de comportamento se deva ao fato da soldagem de Zhang et. Al. [15] ter sido do tipo multipasse.

O mapeamento de microdureza da amostra soldada com o processo HLAW-GMAW CCA (Figura 3.3) mostrou uma ampliação na faixa de dureza, de modo que os pontos com valores de dureza mais elevados chegaram a 293,5HV. Esse valor ainda é relativamente baixo e está associado ao passe de acabamento que teve menor diluição, e consequentemente, teores de Mn e Si mais elevados. Observa-se também o aumento da dureza da ZTA que foi reaquecida. O mapeamento indica que não houve modificação significativa produzida pelo passe de acabamento, na metade inferior da espessura da chapa conforme observado no gráfico da figura 3.8.

O mapeamento de microdureza da amostra soldada com o processo GMAW mostrou uma faixa de dureza semelhante à da amostra HLAW-GMAW CCA, com uma variação de dureza maior no metal de solda, em função da característica multipasse. Naturalmente, nesse processo a diluição é bem menor e mais homogênea ao longo do

metal de solda, em função da maior intensidade das forças que promovem o fluxo de metal líquido na poça de fusão [44].

4.2 2 Relação Tenacidade x Microestrutura

A microestrutura de metais de solda de aço C-Mn baixa liga depende da composição química e da velocidade de resfriamento [43]], sendo de conhecimento geral que o constituinte ferrita acicular é o mais desejado para propiciar resultados elevados de tenacidade ao impacto, visto suas características intrínsecas de pequeno tamanho de grão e contornos de alto ângulo [44]. No entanto, deve-se destacar que a ocorrência deste constituinte em maiores proporções no metal de solda, depende da presença de elementos formadores de inclusões que servem de sítio de nucleação para a ferrita acicular [44,45,46,47], com destaque para o elemento Titânio [44,45,48,49].

No presente estudo, observou-se que o maior efeito na microestrutura observada decorre da composição química diferenciada para os metais de solda (Tabela 3.1). De fato, os resultados obtidos evidenciam diferenças significativas no teor de elementos que apresentam importante contribuição para as propriedades mecânicas, tais como C, Mn e Si [48]. Assim, é esperada uma tenacidade ao impacto superior para a junta GMAW, pois além da execução de soldagem multipasse provocar recristalização na região do entalhe Charpy-V (Figura 3.10), observa-se que o metal de solda desta junta apresenta um balanço mais adequado destes elementos para a tenacidade ao impacto, ou seja, baixo teor de carbono e teor de manganês na faixa de 1,4-1,5% [48]. Em relação ao teor do elemento silício, estudo conduzido por Evans [50] afirma que na faixa de 1,4% Mn, a variação deste elemento nos teores obtidos no presente trabalho não provoca alteração microestrutural significativa. Adicionalmente, o baixo percentual de ferrita acicular no metal de solda (Tabela 3.4) também pode ser atribuído aos elementos de liga presentes que não favorecem a formação de inclusões que seriam potentes formadores deste constituinte, o que está de acordo com outros trabalhos técnicos que estudaram esta questão [44,45,46,47, 51].

No caso do metal de solda da junta híbrida, com teores de C e Mn muito diferentes em relação ao GMAW (Tabela 3.1), Evans [52] ressalta que para estes teores o percentual de ferrita acicular foi próximo ao obtido no presente trabalho. Já na

comparação entre as juntas híbridas, é de destaque o fato que mesmo na região relativa ao passe de acabamento, não houve grande diferença na composição química, devido ao elevado grau de diluição (Tabela 3.1). Assim, os valores de tenacidade ao impacto para ambas às juntas foram próximos (Figura 3.7), como consequência da microestrutura obtida Tabela 3.4 e Figuras 3.10 e 3.11.

A diferença na velocidade de resfriamento pode ter contribuído para um refino microestrutural, notadamente da ZTA (Figura 3.11), pois no metal de solda na região onde foram medidas as propriedades mecânicas (5,0 mm da superfície), não se observou diferenças significativas entre as juntas SCA e CCA. O maior refino obtido para a junta GMAW já era esperado, devido ao efeito do reaquecimento da soldagem multipasse [43].

De uma maneira geral, os resultados obtidos no presente estudo estão de acordo com dados experimentais conduzidos em metais de outros trabalhos técnicos, conforme mostrado na Figura 4.2, que relaciona o parâmetro Pcm com a tenacidade ao impacto de vários metais de solda C-Mn baixa liga, realizados em diferentes condições de processo, aporte térmico e número de passes. [50-58]. No entanto de maior importância no escopo do presente trabalho, é notar que todos os resultados de tenacidade ao impacto obtidos foram superiores aos observados no metal base (Figura.3.7), caracterizando a possibilidade de obtenção de juntas soldadas de boa qualidade com o procedimento experimental aqui proposto.

De fato, considerando as condições de soldagem utilizadas com elevada diluição em aço C-Mn, poderia ser esperado um metal de solda com propriedades inferiores ao metal base [59], o que poderia inviabilizar a proposta do processo híbrido nesta aplicação. Assim, entende-se ser interessante avaliar com mais profundidade o potencial deste processo na soldagem de aços C-Mn.

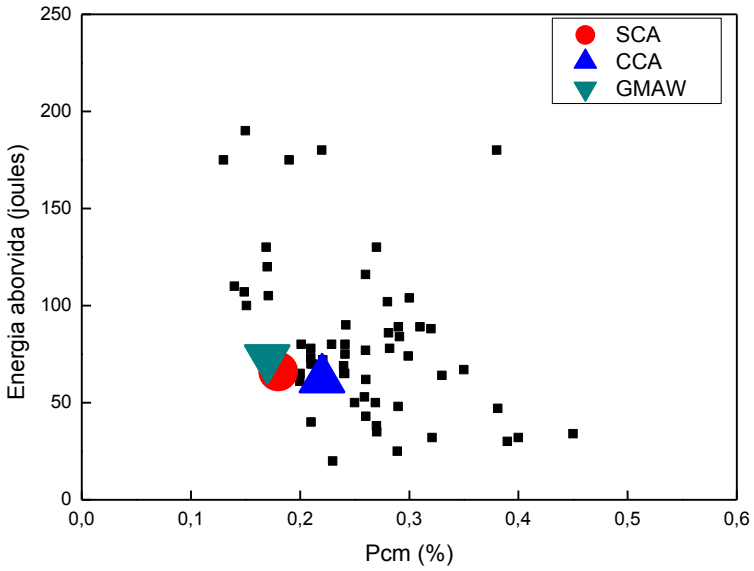


Figura 4.2 – Efeito da composição química na tenacidade ao impacto de metais de solda C-Mn baixa liga segundo diversos autores [50-58]

4.3 Análise Geral dos Resultados

Com base nos resultados obtidos, foi possível evidenciar o potencial do processo híbrido na soldagem de aços C-Mn, tanto do ponto de vista de produtividade, quanto de propriedades mecânicas para obtenção de juntas soldadas com qualidade assegurada de estruturas fabricadas em aço C-Mn. Os ganhos de produtividade e redução de custo são significativos, sendo que nos itens mensurados são da ordem de 75% em comparação com os resultados obtidos com o processo GMAW.

Em termos de propriedades mecânicas da junta soldada, os valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy-V foram compatíveis com os resultados do processo GMAW e superiores ao do metal de base, avaliada na região crítica da junta soldada. O mapeamento de microdureza corroborou os resultados da análise química e da medição de diluição, evidenciando que houve alta diluição no passe único com o processo HLAW-GMAW, da ordem de 71%. No mapeamento não foi identificado nenhum ponto de dureza muito elevado que indicasse a presença de qualquer microconstituinte frágil. A análise microestrutural confirmou os resultados da varredura com o microdurômetro.

As perspectivas para aplicação do processo híbrido LASER-GMAW na soldagem de peças espessas são bastante positivas, pois foi possível confirmar no presente trabalho resultados publicados pelos principais centros de pesquisa do mundo.

Conclusões

Do exposto no transcurso do presente trabalho, pode-se concluir que:

1. A soldagem de aço C-Mn pelo processo HLAW-GMAW envolve um grande número de parâmetros e condições de soldagem, que tornam a otimização da operação bastante complexa. Entretanto, partindo de parâmetros pré-estabelecidos e utilizando uma metodologia adequada para ajuste dos parâmetros à condição específica de operação, é possível obter uma junta soldada sã, com bom aspecto visual e com propriedades mecânicas compatíveis com às do metal base utilizado.

2. As características do processo HLAW-GMAW permitiram a obtenção de uma junta soldada em aço C-Mn com 10 mm de espessura, com um significativo aumento de produtividade (75,5% no tempo de arco aberto) e redução de custo (72,9% no consumo de arame-eletrodo), quando comparado com o processo GMAW.

3. O processo HLAW-GMAW utiliza baixa energia de soldagem, o que representa menores níveis de deformação e de tensões residuais, quando comparado com o processo GMAW.

4. O passe de acabamento com o processo GMAW não introduziu modificação significativa nas propriedades do metal de solda produzido pelo processo híbrido, na região da raiz da solda até a metade da espessura de uma chapa com 10mm de espessura.

Sugestões Para Trabalhos Futuros

1. Avaliar o comportamento da ZTA da junta soldada com o processo HLAW-GMAW, em aço baixa liga.

2. Desenvolver um algoritmo para realizar a otimização de parâmetros de soldagem para o processo HLAW-GMAW.

3. Avaliar o comportamento mecânico/metalúrgico de juntas soldadas com o processo HLAW-GMAW de aços de alta resistência.

4. Estudar os aspectos térmicos na soldagem com o processo HLAW-GMAW.

5. Estudar o efeito dos gases de proteção sobre a soldabilidade e propriedades mecânicas/metalúrgicas de juntas soldadas com o processo HLAW-GMAW.

Referências Bibliográficas:

[1] Bertolotti M. The History of the Laser. London, UK: IOP Publishing; 2005.

[2] Quintino L. et al. Welding with High Power Fiber Lasers- A preliminary Study. Materials & Design. 2007; 28(4): 1231-1237.

[3] Leong KH et al. Threshold Laser Beam Irradiation Melting and Welding. J. of Laser Applications. 1997; 9(5): 227-231.

[4] Gao M. Zeng X. Hu Q. Yan J. Welding Microstructure and Shape of Laser Arc Hybrid Welding. Science and Technology of Welding and Joining. 2008; 13(2):103-113.

[5] Acuña AFF. Hybrid Laser Welding in API X65 and X70 Steels.Thesis (Master Degree) The Ohio State University, USA; 2016.

[6] Steen WM. Arc Augmented Laser Processing of Materials. Journal of Applied Physics. 1980;51:5636-5641.

[7] Allen CM. Gerritsen CHJ. Zhang Y. Mawella J. Hybrid Laser-MAG Welding Procedures and Weld Properties in 4mm, 6mm and 8mm Thickness C-Mn Steels. IIW Commission IV / XII, Intermediate Meeting. Vigo, Spain; 2007.

[8] Moore PJ., Howse DS. Wallach ER. Microstructures and Properties of Laser/Arc Hybrid Welds and Autogenous Laser Welds in Pipeline Steels. Science and Technology of Welding and Joining. 2004; 3: 314-322.

[9] Hu B. den Ouden G. Synergetic Effects of Hybrid Laser/Arc Welding. Science and Technology of Welding and Joining. 2013;10: 427-431.

[10] Steen, W. M. Arc augmented LASER processing of materials, Journal of Applied Physics, 1980, vol. 51.

[11] Hu, b. den Ouder, G. – Synergic effects of hybrid LASER /arc welding, Science and Technology of Welding and Joining, 2005, vol.10 nº 4 pp 427-431.

[12] Matsuda, Utsumi, Katsumura, Hamasaki, TIG or MIG augmented LASER welding of thick mild steel plate, Joining and Materials, 1988, vol. 1, pp 31-34.

[13] Casalino, G., Dal Maso, U., Angelastro, A., Campanelli, S. L., Hybrid LASER Welding: A Review, DAAAM International Scientific Book 2010, Chapter 38, B. Katalinic Ed., Vienna, Austria, pp 413-430.

[14] Nielsen, S. E., Higher power LASER hybrid welding – Challenges and perspectives, Physics Procedia, 2015, vol.78, pp 24-34.

[15] Zhang, C., Li, G., Gao, M., Zeng, X.Y., Microstructure and mechanical properties of narrow gap LASER-Arc hybrid welded 40mm thick mild steel, Material, vol 106, 2017 pp1-10.

[16] Webster, S.E. et alli, Hyblas: Economical and safe LASER hybrid welding of structural steel, Final Report, European Commission, Luxembourg, 2009.

[17] Engstron, H., Nilsson, K., Flinkfeldt, J., Nilsson, T., Skirfors, A., Gustavsson, B., LASER hybrid welding of high strength steels, Orlando, Fla.: Laser institute of America , 2001. 125-134 p.

[18] Unt, A., Poutiainen, I., Salminen, A., Influence of filler wire feed rate in LASER-Arc hybrid welding of T-butt joint in shipbuilding steel with different optical setup, Physics Procedia 78, 2015, Lappeenranta, Finland, pp 45-52.

[19] Costa, J. F. M., Relatório interno de visita à Feira de Essen, White Martins Gases industriais Ltda., 2009.

[20] Catálogo do cabeçote híbrido LASER-GMAW da empresa Fronius.

[21] Catálogo do cabeçote híbrido LASER-GMAW da empresa Closs.

[22] Sathiya, P., Mishra, M.K., Soundararajan, R., Shanmugarajan, B., Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented LASER welding process of super austenitic stainless steel, Optics & LASER Technology vol. 43, 2013, pp 46-55.

[23] Le Guen, E., Fabbro, R., Carin, M., Coste, F., Le Masson, P., Analysis of hybrid Nd:Yag LASER-MAG arc welding processes, Optics & LASER Technology, vol.43, 2011, pp 1155-1166.

[24] Roepke, C., Liu, S., Kelly, S., Martukanitz, R., Hybrid LASER arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel, Welding Journal july 2010, vol. 89, pp 140-150.

[25] Chen, Y., Lei, Z., Li, L., Wu, L., Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in CO_2 LASER-MIG hybrid welding process, Chinese Optics Letters, jan. 2006, vol. 4 Nº 1, pp 33-35.

[26] Lamas, J., Frostevarg, J., Kaplan, A.F.H., Gap bridging for two modes of LASER arc hybrid welding, vol 224, 2015, pp 73-79.

[27] Li, R., Yue, J., Sun, R., Mi, G., Wang, C., Shao, X., A study ofdroplet transfer behavior in ultra-narrow gapLASER arc hybrid welding, Jounal of Advanced Manufactured Technology, vol.87, 2016, pp 2997-3008.

[28] Blecher, J.J., Palmer, T.A., DebRoy, T., Mitigation of root defects in LASER and LASER hybrid arc welding, Welding Journal, March 2015, pp 73-82.

[29] Ilar, T., Erikssen, I., Powell, J., Alexander, K., Root humping in LASER welding - an investigation based on high speed imaging, Physics Procedia, December 2012.

[30] Keene, B. J., Review of data for the surface tension of pure metals, International Materials Review, vol.38 No 4, 1993, pp 157-192.

[31] Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M., Hybrid LASER arc welding of X80 and X120 steel grade, Science and Technology of Welding and Joining, vol. 19 No 1, 2014, pp15-24.

[32] Moradi, M., Ghoreishi, M., Frostevarg, I., Kaplan, A., An investigation on stability of LASER hybrid arc welding, Optics and LASERS in Engineering, vol. 51, 2013, pp 481-487

[33] Suder, W.J., Study of fundamental parameters in hybrid LASER welding, Cranfield University, PhD Thesis, 2011.

[34] Diebold, T.P., Albright, C.E., LASER-GTA Welding of aluminum alloy 5052, Welding Journal, 1984, vol. 63 no 6, pp 18-24.

[35] Ribic, B., Palmer, T.A., DebRoy, T., Problems and issues in LASER-arc hybrid welding, International Materials Reviews, 2009, vol. 54, no 4, pp 223-244.

[36] Moore, P.L., Howse, D.S., Wallach, E.R., Microstruture and properties of LASER-arc hybrid welds and autogenous LASER welds in pipelinesteels, Science and Technology of Welding and Joining, 2004, vol. 9 no 4, pp 314-322.

[37] Karlsson, L., Svensson, L., Hurtig, K., Influence of dilutionon the properties of high strength steels weld metals, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2014, no 5, pp 62-70.

[38] Wei, H.L., Blecher, J.J,, Palmer, T. A., DebRoy, T., Fusion zone microstructure and geometry in complete joint penetration LASER-arc hybrid welding of low alloy steel, Welding Journal, 2015, vol. 94, pp 135-144.

[39] Bagger, C., Olsen, F., Review of LASER hybrid welding, Journal of LASER Applications, 2005, vol. 17, no 1, pp 2-14.

[40] AWS A5.18 –Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Shielded Arc Welding. 2007.

[41] ASTM E23 -16b Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2016b

[42] Gonçalves, Daniel C.; Martins, Mateus C.; Maria P. Cindra, Maria P.F.; Numerical and Experimental Study of Residual Stress in Welded Joints, Soldagem & Inspeção. 2017;22(2):147-162

[43] Song, H.Y., Evans, G.M. and Babu, S.S., Effect of microstructural heterogeneities on scatter of toughness in multi-pass weld metal of C–Mn steels, Science and Technology of Welding and Joining, 19(5), p. 376-384, 2014.

[44] Loder D., Michelic S.K., Bernhard, C., Acicular ferrite formation and its influencing factors - A review, J. Mat. Sci. Res., 6(1), p.24-43, 2017.

[45] Ilman, M.N., Cochrane, R.C. and Evans, G.M., Effect of titanium and nitrogen on the transformation characteristics of acicular ferrite in reheated C–Mn steel weld metals, Welding in the World, 58, p.1–10, 2014.

[46] Seo, K., Kim, Y., Evans, G.M., Kim, H.J. and Lee, C., Formation of Mn-depleted zone in Ti-containing Weld Metal, Welding in the World, 59(3), p. 373-380, 2015.

[47] Kim, K., Kim, H.J., Evans, G.M. and Choa, Y., Microstructure and inclusion characteristics of C-Mn Steel welds at a minimal level of Titanium, IIW Doc.IX-2603-17.

[48] Evans, G.M. and Bailey, N., Metallurgy of basic welding, Abington Publ., 1997.

[49] Evans, G.M., The effect of titanium in SMA C-Mn steel multipass deposits, Welding Journal, 71(12), p.447s–454s, 1992.

[50] Evans , G.M., The effects of Silicon on the microstructure and properties of C-Mn all weld metal deposits, Welding Reasearch Abroad, 37(2/3), p. 20-31 , 1991.

[51] Jorge , J.C.F., Souza, L.F.G. and Rebello, J.M.A., Effect of dilution, heat input and stress relieving on the microstructure/toughness relationship of C-Mn and low alloy steel weld metals, Revue de la Soudure, 3, p.42-50, 1996.

[52] Evans , G.M., The effect of Carbon on the microstructure and properties of C-Mn all weld metal deposits, Welding Reasearch Abroad, 29(1), p.13-23, 1983.

[53] L. Karlsson, L.E. Svensson and K. Hurtig: ‘Influence of dilution on properties of high strength steel weld metals’, Biu. Inst. Spaw., 2014, 5, 62-70.

[54] Gianetto, J.A., Smith, N.J., Mc Grath, J.T. and Bowker, J.T., Effect of Composition and Energy Input on Structure and Properties of High-Strength Weld Metals, Welding Journal, 71(11), p.407s-419s, 1992.

[55] Peng, Y., Peng, X., Zhang, X., Tian, Z.and Wang, T., Microstructure and Mechanical Properties of GMAW Weld Metal of 890MPa Class Steel, J. Iron and Steeel Res. Int, 21(5), p.539-544, 2014.

[56] Schnitzer, R., Zügner, D., Haslberger, P. , Ernst, W. and Kozeschnik, E., Influence of alloying elements on the mechanical properties of high-strength weld metal, Science and Technology of Welding and Joining, DOI:10.1080/13621718.2016.1274095, 2017.

[57] Clóvis Ribeiro Rodrigues e Machado, I.G., Influencia do níquel nas propriedades mecânicas do metal de solda, Anais do XXVI CONSOLDA , Curitiba, p.1-9, 2000.

[58] Jorge, J.C.F., Souza, L.F.G. and Rebello, J.M.A., The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C-Mn weld metal deposits, Materials Characterization, 47, p.195-205, 2001.

[59] Nathan, S.R., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S. and Rao, A.G., Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints, Defence Technology, 11, p. 308-317, 2015.