



AVALIAÇÃO E APLICABILIDADE DA SOLDAGEM PLASMA PELA TÉCNICA KEYHOLE

⁽¹⁾ *Óder Silva de Paula Jr.*

⁽²⁾ *Jair Carlos Dutra*

RESUMO

Este trabalho representa uma contribuição para uma melhor caracterização da soldagem plasma pela técnica keyhole, no que concerne à determinação dos parâmetros e variáveis para soldagem do aço 1020, trabalhando-se com corrente contínua constante e pulsada, tanto na posição plana como vertical. Foram obtidos bons resultados na posição vertical, especialmente pela utilização da corrente pulsada. Para a análise da qualidade das soldas foram efetuadas metalografias de seções transversais retiradas dos corpos de prova soldados. Ensaios de dobramento de face e de raiz, bem como radiográfico também foram realizados.

Os resultados mostraram que o processo apresenta uma boa repetibilidade, com soldas isentas de defeitos. Um rigoroso controle dos parâmetros e variáveis de soldagem torna-se necessário para obter soldas de boa qualidade. Obteve-se uma satisfatória produtividade, especialmente para chapas de maior espessura, que foram soldadas em passe único.

Palavras-chave: Soldagem plasma, Keyhole, Parâmetros de soldagem.

ABSTRACT

This work is a contribution to the characterization of the plasma welding process using the keyhole technique, specifically with respect to the selection of parameters and variables for the welding of 1020 steel with pulsed and constant current. Good results were obtained welding in the flat and vertical position, particularly when using pulsed current. To assess the quality of the welded joints, there were done some macrographic analysis, root and face bend tests and radiographic tests.

The results show that the process has good repeatability, and results in defect free welds. A rigid control of parameters and variables is necessary to obtain good quality welds. With respect to the process productivity, it was satisfactory, especially for high thickness plates because they were welded with a single pass.

Key words: Plasma welding, Keyhole, and welding parameters.

⁽¹⁾ Eng. Mecânico, M.sc., Fiat Allis, Dep^{to} de Engenharia de Manufatura
CEP – 32210-900 - Fax: (031) 329-3186 – Fone (031) 329-3111 Ramal 3189, Contagem - MG

⁽²⁾ Dr. Eng., Prof. LABSOLDA/UFSC
Cx. P. 476 - 88040-900 - Fax: (048) 234-6516 - e-mail: labsolda@emc.ufsc.br, Florianópolis SC



1 - INTRODUÇÃO

Com a crescente utilização de novos materiais, bem como com o aumento das exigências de qualidade associadas à necessidade emergente de melhorar a produtividade e flexibilização dos processos de fabricação, assiste-se cada vez mais à busca de otimização e desenvolvimentos de novas tecnologias e processos que venham a atender estas exigências. No âmbito desta busca encontra-se o processo de soldagem plasma, que embora tenha sido inventado há mais de 40 anos [1, 2], ainda é considerado um processo avançado de soldagem, devido não só aos desenvolvimentos relativamente recentes, bem como à sua utilização limitada a aplicações relativamente nobres [3].

Basicamente, o processo de soldagem ao arco elétrico denominado de soldagem plasma - PAW, pode ser considerado uma evolução do processo TIG. Isto porque em ambos os casos têm-se um eletrodo não consumível de tungstênio e uma proteção do arco voltaico com gás inerte contra a contaminação atmosférica. A principal diferença é que na soldagem plasma o eletrodo fica confinado, concentrando mais o arco, que assume uma forma essencialmente cilíndrica. Consegue-se desta forma uma boa estabilidade direcional e um maior efeito de concentração de energia, produzindo assim uma menor ZAC [1, 4, 5, 6, 7]. A relativa tolerância à variação da distância da tocha em relação à peça-obra é outra vantagem do processo advinda da constrição do arco.

Dois modos bastante distintos são empregados para soldar peças dentro de uma ampla faixa de espessura: o modo "melt-in" (soldagem convencional por fusão), e o "keyhole". Este último também é conhecido como técnica do "buraco de fechadura". A soldagem plasma pela técnica keyhole apresenta as vantagens de se poder obter maiores velocidades de soldagem, penetração total e uniforme, além de uma simplificação nos procedimentos de preparação da junta [1, 2, 4]. Suas aplicações vão desde a utilização em diversos componentes das mais variadas áreas da indústria, bem como a componentes de paredes finas utilizados em equipamentos médicos e de instrumentação, como por exemplo, junções de termopares [2].

A introdução do plasma pulsado nos últimos anos generalizou a utilização deste processo a várias outras aplicações, tal como, a soldagem de tubos em todas as posições [8, 9]. Halmoy et al. [9], demonstraram aplicações do processo para reparos e fabricação off-shore, destacando-se a soldagem de tubos de aço inoxidável dúplex com espessura de 6,35 a 10,6 mm. A redução no tempo de soldagem mostrou ser considerável e da ordem de 50% em comparação com o TIG.

Outra contribuição para o avanço no campo de aplicações foi a utilização da corrente alternada, que foi desenvolvida basicamente para ser utilizada na soldagem do alumínio e suas ligas [10], sendo atualmente utilizado o arco plasma nestes tipos de aplicações especialmente na indústria aeroespacial [10, 11, 12]. Tomsic e Barhorst [11], destacaram a aplicabilidade satisfatória da corrente alternada de onda retangular para soldagem do alumínio. Eles estabeleceram uma relação entre os tempos e amplitudes de corrente para algumas ligas de alumínio de espessura igual a 6,35 mm, e demonstraram o efeito dos mesmos sobre a solda. Em típicos períodos de tempo da ordem de 19 ms na polaridade direta e 4 ms na polaridade inversa, foi verificado um bom efeito de limpeza da peça-obra, mínimo desgaste do eletrodo e boa estabilidade do arco. Martikainen e Moisio [5], desenvolveram um estudo da soldagem plasma pela técnica keyhole em diversos tipos de aços estruturais e obtiveram soldas isentas de defeitos, com bom limite de resistência à tração e tenacidade.



Estudos posteriores aliados a estes novos conhecimentos permitiram que se observassem as vantagens oferecidas pela soldagem plasma em aspectos como a velocidade, comparativamente, por exemplo, à soldagem MIG principalmente no que se refere à profundidade de penetração. A penetração é limitada apenas pela impossibilidade da tensão superficial sustentar qualquer dimensão da coluna de metal líquido durante a soldagem. A qualidade da solda, bem como as suas velocidades elevadas comparativamente às do TIG também tornaram a soldagem plasma um processo altamente competitivo em relação a este último.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Materiais

Como metal de base utilizou-se na maioria dos experimentos e no desenvolvimento deste estudo o aço 1020 nas espessuras de 3,2 - 4,8 - 6,35 -10 e 25,4 mm. O eletrodo utilizado foi o EWTh2 (tungstênio com 2% de tório), de 4,8 mm de diâmetro. O ângulo de ponta foi mantido a 30°. Utilizou-se bocais constritores com os seguintes diâmetros de orifício: 2,8 e 3,2 mm, selecionados em função da corrente máxima de soldagem para os quais eram indicados [13]. Os gases utilizados nos experimentos foram o argônio standard tanto como gás de plasma como para gás de proteção. Grau de pureza de 99,99%. Um cilindro para cada linha. O arame-eletrodo para enchimento das juntas onde se soldou com o plasma pela técnica keyhole para passe de raiz e preenchimento da junta pelo processo MAG com transferência por spray, foi o AWS ER70 S-6. Para este caso específico utilizou-se como gás de proteção durante a soldagem MAG uma mistura de argônio com CO₂ (C18).

2.1.1 - Infra-estrutura utilizada

Para a realização dos experimentos, a infra-estrutura básica utilizada consistiu de uma fonte de soldagem multiprocesso, módulo plasma, medidores digitais de vazão de gás, sistema de deslocamento computadorizado da tocha de soldagem, "softwares" para comando e aquisição de dados desenvolvidos em turbo Pascal, um microcomputador com impressora e uma placa de aquisição de dados. Também fez parte da infra-estrutura de experimentação, a tocha de soldagem plasma modelo PWM-300 e uma válvula controladora de vazão mássica que foi fornecida pelo Centro Tecnológico da Aeronáutica - CTA. Esta válvula foi utilizada para um controle fino da vazão do gás de plasma

2.2 - Procedimentos de soldagem

A maioria dos ensaios foram realizados na posição plana (1G), utilizando-se a corrente contínua constante (CC-) e pulsada. Alguns ensaios foram realizados na posição vertical utilizando-se também as mesmas formas de corrente. O tipo de junta nos CP's para soldagem plasma pela técnica keyhole foi a junta de topo com folga zero, com as bordas das chapas usinadas na região da junta. Só houve adição de material quando foram soldados os CP's com a configuração da junta em V, aço 1020 de espessuras 10 e 25,4 mm soldados na posição plana. Nestes casos o passe de raiz foi com o processo plasma autógeno e o passe de enchimento com o MAG. A folga na raiz também era zero e o nariz foi usinado na dimensão de 6,0 mm. Os CP's foram preparados nas dimensões de 160 x 120 mm, sendo que ambos os lados de sua superfície eram submetidas a um lixamento prévio para remoção da carepa de



laminação formada sobre o material. Na análise metalográfica os CP's foram lixados até lixa 600 mesh, polidos e atacados com nital a 5%. Para medir a largura dos CP's utilizou-se um projetor de perfis com capacidade de aumento de 10X e o reforço foi medido com um paquímetro. O recuo do eletrodo foi mantido sempre em 2,4 mm. Para garantir com exatidão esta medida utilizou-se um calibre padrão, acessório que acompanha a tocha de soldagem.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma série de experimentos foram realizados para estabelecer os melhores parâmetros e variáveis para o material utilizado neste trabalho e que proporcionassem a obtenção da técnica keyhole, ou seja, a ocorrência de penetração total, levando a obter uma solda de qualidade. O padrão de aceitação adotado foi que as soldas apresentassem ausência de descontinuidades, tais como: porosidades, trincas e mordeduras acentuadas. Adotou-se um nível de significância de 1% e níveis de aceitação propostos pelas normas BS [14] e DIN [15]. Foram muitas as dificuldades encontradas para estabelecer os melhores procedimentos de soldagem, especialmente pela falta de dados e informações operacionais disponíveis na literatura pesquisada. Mesmo assim, se conseguiu estabelecer bons procedimentos de soldagem, que estão apresentados nas tabelas 1 e 2.

3.1 – Levantamento da repetibilidade dos resultados

Antes de iniciar um estudo mais abrangente da soldagem plasma, verificou-se a repetibilidade dos resultados, ou seja, a capacidade que o processo tem de repeti-los. A análise se baseou em fundamentos estatísticos. O material de base foi o aço 1020 de espessura igual a 4,8 mm. Os parâmetros e variáveis adotados para esta análise estão apresentados na tabela 1. Este estudo foi realizado baseando-se em medições da largura da solda e reforço na raiz em vários pontos ao longo de cada corpo de prova soldado, sendo um total de cinco CP's. De cada CP foram extraídos dez valores de largura da solda e sete de reforço na raiz. Todos os CP's foram submetidos à mesma metodologia e condições de soldagem. Estes valores foram comparados e submetidos a uma análise estatística - teste F [16].

A verificação da capacidade que o processo tem de repetir os resultados pode ser observada nas tabelas 3 e 4, que retratam respectivamente os dados levantados e calculados para reforço na raiz e largura da solda. Na tabela 5 são mostradas as grandezas calculadas para o processamento desta análise, baseada no método da análise da variância [17]. Defini-se repetibilidade como: "variação das medições obtidas quando o mesmo operador mede a mesma dimensão ou característica várias vezes utilizando o mesmo instrumento e método [16]. Entenda-se aqui como repetibilidade, no caso específico da soldagem plasma, o objetivo de se conseguir resultados similares utilizando para soldar os CP's (amostras), os mesmos métodos, operador, preparação de amostras e procedimentos de soldagem idênticos.

Com relação ao reforço na raiz, verificou-se que F_{cal} foi menor que F_{crit} ($0,1684 < 9,15$). Demonstra-se que não há diferenças significativas entre as amostras. Portanto há repetibilidade.

No caso da largura da solda, nota-se também uma boa repetibilidade, a exemplo do que foi observado com relação ao reforço na raiz. Para este caso verifica-se também que F_{cal} foi menor que F_{crit} ($4,49 < 6,42$). Deste modo, pode-se dizer que a repetibilidade dos resultados é boa e em 99% dos casos os valores de largura da solda e reforço na raiz estarão dentro da faixa de repetibilidade.



Cabe aqui ressaltar que os valores de reforço na raiz medidos nos CP's estão enquadrados dentro dos níveis de aceitação propostos pelas normas BS [14] e DIN [15]. Não foi encontrado em norma um critério de aceitação aplicável à largura da solda.

3.2 - Influência da vazão do gás de plasma

Para esta análise adotou-se como material de base o aço 1020 de 4,8 mm de espessura e a condição de soldagem descrita na tabela 1. As vazões empregadas foram de 0,8; 1,2; 1,7 e 2,2 l/min. Constatou-se neste estudo que a vazão do gás de plasma tem uma forte influência no comportamento da poça de fusão, na aparência da solda e principalmente sobre o reforço na raiz. Isto pôde ser facilmente verificado comparando-se as características das soldas. Para uma vazão de 0,8 l/min observou-se que embora tenha ocorrido o keyhole, o reforço na raiz não se apresentou efetivamente uniforme e regular. Percebeu-se que em alguns pontos houve uma tendência à não ocorrência de penetração total, o que proporcionou uma raiz de aspecto irregular. A solda mostrada na figura 1, onde se utilizou uma vazão de 1,2 l/min, apresentou um reforço na raiz bem mais homogêneo [18]. Para as vazões superiores utilizadas nesta análise, obteve-se um excessivo reforço na raiz, ocasionado provavelmente pela maior força do jato de plasma, que se mostrou diretamente proporcional ao aumento da vazão do gás. Nestes casos as soldas realizadas não atenderam aos critérios de aceitação adotados, pois em alguns pontos ao longo da raiz o reforço apresentou-se com dimensões acima da permitida pelas normas.

Importante observar que os experimentos confirmam a afirmação de Bennett [19], que afirma que pequenas variações na vazão do gás de plasma causam significantes alterações na solda. Para se conseguir uma solda de bom aspecto e qualidade basta adequar a vazão a uma velocidade de soldagem e corrente compatíveis com a mesma.

3.3 - Influência do ângulo do eletrodo

Para esta investigação adotou-se como material de base o aço 1020 de espessura igual a 6,35 mm. O estudo foi realizado com base na observação do aspecto visual da solda e medindo-se os valores de reforço na raiz e largura da solda. Nesta análise foi aplicado o teste F. Desta forma pôde-se verificar se o ângulo tendeu ou não a afetar a geometria da solda, especialmente a largura e reforço na raiz. Para ângulos de ponta de 15°, 30° e 45° foram efetuadas soldas onde mediu-se 10 valores de reforço na raiz e largura da solda.

Com relação ao reforço na raiz, verificou-se que F_{cal} foi menor que F_{crit} ($1,08 < 8,02$). Demonstra-se que não há diferenças significativas entre as amostras. Portanto, o ângulo da ponta do eletrodo tende a não afetar o reforço na raiz.

No caso da largura da solda, o F_{cal} foi maior que o F_{crit} ($10,64 > 8,02$), o que indica que neste caso, o ângulo do eletrodo exerceu uma certa influência, pois houve diferenças significativas entre as amostras. Os resultados desta análise demonstram que para o processo plasma o ângulo do eletrodo tende a exercer uma influência sobre a solda com efeito contrário ao que se verifica no processo TIG, que é similar ao processo plasma. Em geral, no TIG quanto mais obtuso o ângulo do eletrodo há uma maior tendência a se obter um aumento da penetração e redução na largura [2]. Entretanto, estes resultados citados na literatura podem ser alterados, pois também há uma influência da composição química do metal de base.



Um fato que marcou a realização destes experimentos foi a não abertura do arco piloto quando se utilizou o ângulo de ponta igual a 60° . Foi observado que o arco não conseguia partir e circundava a região lateral do eletrodo que se encontrava mais próxima da saída do bocal constritor.

3.4 - Passe de raiz em chapas espessas

Foram realizados passes de raiz nas chapas de 10 e 25,4 mm de espessura, preparadas com chanfro em V, conforme procedimento descrito na tabela 1. O corpo de prova de 10 mm de espessura foi soldado em dois passes: o primeiro de raiz utilizando o processo plasma, e o segundo de enchimento, efetuado com o processo MAG com transferência por spray. A penetração na raiz foi perfeita, sendo que a obtenção do keyhole e sua manutenção durante a soldagem se mostraram satisfatórias, não ocorrendo descontinuidades ou imperfeições na forma. Os mesmos resultados foram alcançados quando se soldou o corpo de prova de 25,4 mm. Neste porém, foi efetuado apenas o passe de raiz.

Percebe-se que o processo plasma também pode ser utilizado com êxito em chapas de maior espessura, com a configuração da junta em V, e com certeza com consideráveis ganhos de produtividade pois, empregando apenas o processo MIG/MAG ou TIG provavelmente seriam necessários mais passes para o completo preenchimento da junta. É importante ressaltar que pode-se reduzir o ângulo da junta, que nestes experimentos foram mantidos em 90° em virtude da geometria do bocal da tocha utilizada. Com isso reduz-se ainda mais o número de passes para o completo preenchimento da junta. Nos experimentos realizados não foi possível reduzir o ângulo de abertura da junta pois, adotando-se ângulos menores, a distância tocha-peça aumentaria, atingindo valores que influenciariam nos resultados.

3.5 - Ensaio mecânico e radiográfico

Foram realizados dois tipos de ensaios nas juntas soldadas. O primeiro ensaio realizado foi o radiográfico, que permite revelar possíveis descontinuidades internas em toda a extensão da solda, tais como poros e/ou trincas. Após o ensaio radiográfico e utilizando as mesmas juntas foi efetuado o segundo ensaio: dobramento transversal de face e de raiz. Estes ensaios foram realizados tendo-se como material de base o aço 1020 de 6,35 mm de espessura soldados na posição plana com junta em I folga zero, aplicando-se a corrente constante. Foram preparados dois CP's em conformidade com o código ASME – seção IX [20]. A análise dos resultados deste ensaio foi baseada na observação visual dos corpos de prova durante e após a realização do mesmo. Os CP's foram dobrados a 180° . Observou-se que as soldas efetuadas são isentas de descontinuidades, com ausência total de poros e/ou trincas. Como era de se esperar, diante dos resultados fornecidos pelo ensaio radiográfico, durante o dobramento transversal de face e de raiz não foi verificada qualquer fissura superficial nas juntas ensaiadas. Para se certificar da boa ductilidade apresentada pela solda, após o ensaio, os CP's foram examinados com uma lupa, onde novamente constatou-se a ausência de fissuras.

Com os mesmos parâmetros/variáveis utilizados para soldar os CP's submetidos aos ensaios de dobramento e radiográfico foram soldados alguns CP's utilizando-se o programa CTA1, que foi elaborado para permitir o controle da vazão do gás de plasma. A finalidade foi avaliar a influência de um controle de aclave e declive da vazão do gás de plasma sobre a abertura e principalmente o fechamento



do keyhole. Ocorre que durante a abertura do keyhole o material fundido tende a ser lançado para trás, em sentido oposto ao deslocamento da tocha de soldagem. Com isto forma-se uma região convexa no início da solda, caracterizada muitas vezes pela ausência de penetração total e de um acúmulo excessivo de material solidificado. Uma descontinuidade um pouco mais acentuada é verificada no término da operação de soldagem, onde o furo do keyhole fica aberto no final da solda.

Utilizando o programa CTA1, pode-se perceber que no final das soldas, especialmente na região de fechamento do keyhole foram alcançados bons resultados. Os corpos de prova foram submetidos a duas condições: uma onde não se teve o controle da vazão e outra, onde foi efetuado o controle. Verificou-se que há realmente uma significativa diferença quando é empregada a rampa de gás [18]. O furo característico do keyhole, que é facilmente identificado quando não se utiliza a rampa é fechado e em seu lugar fica uma suave depressão no final da solda que diminui gradativamente à medida que a corrente de soldagem e a vazão do gás de plasma decaem de acordo com o programado na rampa. A rampa de corrente foi ajustada manualmente em potenciômetros no painel da fonte. Nos experimentos foram adotados valores iguais (5 s), tanto para aclive quanto para declive da corrente. Com relação ao fechamento do keyhole, os melhores resultados foram obtidos adotando-se um tempo de descida da vazão do gás de plasma maior que o tempo de decaimento da corrente. Com tempos menores, o furo era reduzido, mas não se fechava por completo. Com relação a abertura do keyhole no início da soldagem, não foram alcançados bons resultados.

Cabe aqui ressaltar que para se chegar a conclusões mais precisas é necessário que se realize um número maior de testes, mas fica evidenciado que o controle da vazão do gás de plasma é fundamental para abertura e principalmente o adequado fechamento do keyhole.

3.6 - Corrente pulsada

No caso da corrente pulsada foi encontrada uma certa dificuldade para obtenção do keyhole, especialmente pelo maior número de parâmetros/variáveis a serem determinados. Mesmo assim conseguiu-se estabelecer um bom procedimento de soldagem, cujos dados estão apresentados na tabela 2. Durante os experimentos notou-se que a corrente pulsada proporciona uma melhor estabilidade do keyhole. Isto se verifica quando se tem o adequado conjunto de parâmetros/variáveis de soldagem. A penetração total da solda é garantida na fase de pulso, onde a amplitude da corrente e seu respectivo tempo fornecem as condições ideais para que o jato de plasma penetre pela poça de fusão. Na fase de base, o material anteriormente fundido inicia a solidificação, que não é totalmente concluída permitindo que no pulso subsequente se forme novamente o keyhole. Na superfície dos CP's soldados verificou-se a presença de pequenas mordeduras. Estas mordeduras foram analisadas e a profundidade destas não excedeu o estabelecido pelas normas. Elas se tornaram mais acentuadas quando se utilizou vazões maiores que 2,0 l/min, porém não extrapolando os níveis de aceitação das normas. Para uma vazão menor e mantidos os demais parâmetros, não era obtida a penetração total. Interessante observar que a vazão de gás de plasma utilizada em corrente pulsada para a obtenção de uma solda de qualidade foi um pouco superior àquela adotada para soldagem com corrente constante (1,4 contra 2,0 l/min).

O relacionamento entre os tempos de base e de pulso foi outro fator determinante na característica das soldas. Melhores resultados foram alcançados quando foram utilizados tempos iguais [18]. Duas variações foram testadas e não



apresentaram bons resultados. A primeira foi utilizando tempos de pulso maiores que os tempos de base. Foi verificado um excessivo reforço na raiz, que caracteriza o excesso de penetração da solda. Além disso, ocorreu um crescimento dimensional das mordeduras, extrapolando os limites permitidos pelas normas. Para tempos de base maiores que os de pulso ocorreu falta de penetração na raiz. O material fundido tinha mais tempo para se solidificar e fechar o keyhole que se formava. Ocorria então, a falta completa de penetração ou falhas na raiz das soldas efetuadas nestas condições.

Se comparadas com as soldas realizadas em corrente constante, pode-se perceber que as soldagens efetuadas em corrente pulsada alcançaram uma menor velocidade de soldagem para um material de base de mesmo tipo e espessura [18]. Entretanto, nestes experimentos a corrente média empregada na transferência pulsada foi fixa e da ordem de 25% menor (em média) que a aplicada em corrente constante. Pode-se observar que as velocidades de soldagem obtidas na transferência pulsada são bem próximas as obtidas em corrente constante. Com relação a geometria da solda, em específico a largura e reforço na raiz, as soldas apresentaram valores muito próximos aos obtidos quando solda-se com corrente constante. Foi verificado que a ponta do eletrodo apresentou uma maior tendência ao desgaste durante as operações em corrente pulsada, comparando-se por exemplo, com o desgaste provocado pela utilização do eletrodo em corrente constante.

Por outro lado em corrente pulsada, a obtenção do keyhole e sua manutenção e estabilidade se mostrou ser mais satisfatória que nas operações com corrente constante [18].

3.7 - Soldagem na posição vertical

Na literatura pesquisada não foi encontrada nenhuma informação sobre a aplicação da técnica keyhole para soldagens na posição vertical e tendo-se como material de base o aço-carbono. Acredita-se que esta seja uma contribuição relevante para o avanço das pesquisas sobre a soldagem plasma.

Soldou-se nas posições vertical ascendente e descendente, empregando-se a corrente constante e a corrente pulsada. Para os CP's de 3,2 mm os melhores resultados foram obtidos soldando-se na posição vertical descendente, tanto com corrente constante como em corrente pulsada. Tentou-se soldar os CP's de 3,2 mm na posição vertical ascendente. Contudo, tanto em corrente pulsada, quanto em corrente constante, ocorreu um excessivo escorrimento do material fundido na região da junta. Formava-se o keyhole mas, ao invés da poça de fusão se solidificar, ela escorria em sentido oposto ao deslocamento ascendente da tocha. Além da própria massa do material fundido, a força da gravidade atuava no sentido de favorecer o escorrimento da poça de fusão formada. Com isto, ficavam crateras ao longo da solda, deixando grandes falhas ao longo de sua extensão. Talvez este efeito tenha sido favorecido ainda mais em virtude da menor espessura do material de base.

Com relação aos CP's de 6,35 mm, foram levantados procedimentos para a soldagem na posição vertical descendente e ascendente com a utilização da corrente pulsada. Verificou-se que, embora tenha sido obtido um adequado conjunto de parâmetros e variáveis para a soldagem na posição vertical ascendente, a solda não apresentou bons resultados. Na superfície da solda pôde-se perceber acentuadas mordeduras. A raiz não apresentou um adequado reforço, ficando praticamente no mesmo plano do material de base. Isto pode ser explicado porque, a exemplo do que ocorreu quando se tentou soldar os CP's de 3,2 mm na posição vertical ascendente, aqui também ocorreu o mesmo efeito de escorrimento da poça de fusão. A diferença



básica foi que o material fundido conseguia se solidificar, mesmo sobre o efeito de sua própria massa e da força da gravidade que tendia a expulsá-lo da poça de fusão. Contudo, o material que formaria o reforço na raiz foi “puxado” para a superfície da solda. Com relação às soldas efetuadas na posição vertical descendente, tanto a superfície, quanto a raiz apresentaram um aspecto muito satisfatório. Uma ligeira concavidade foi notada na superfície da solda, provocada provavelmente pela fuga de material fundido pela raiz durante a solidificação. Importante ressaltar que diante dos melhores parâmetros/variáveis estabelecidos para se soldar em passe único os CP's de 6,35 mm de espessura com a configuração da junta de topo, pôde-se notar que a soldagem na posição vertical descendente, além de apresentar melhores resultados, proporcionou a possibilidade de se alcançar uma maior velocidade de soldagem [18].

4 - CONCLUSÕES

Estabelecer um adequado procedimento de soldagem com a determinação dos melhores parâmetros/variáveis indicados para se obter o keyhole é uma tarefa que requer bastante meticulosidade, pois pequenas alterações nos parâmetros/variáveis afetam significativamente a qualidade da solda. Pôde-se concluir também que:

a) Atenção especial tem que ser dispensada com relação a: bocais constritores, abertura na junta a ser soldada, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e vazão do gás de plasma. O desgaste do orifício constritor devido, principalmente a uma condição de soldagem inadequada, afeta a solda e prejudica a obtenção do keyhole. Também diferentes diâmetros de orifício resultam em distintos procedimentos de soldagem para um mesmo tipo e espessura de material.

b) O gás de plasma afeta efetivamente na penetração. Pequenas variações na vazão levam a ocorrência de descontinuidades, tais como: falta de penetração, mordeduras e excessivo reforço na raiz.

c) Em juntas de maior espessura com configuração em V a técnica keyhole se mostrou uma alternativa muito boa, especialmente para passes de raiz.

d) Os resultados dos ensaios mecânico e radiográfico mostraram que as soldas efetuadas na posição plana apresentam uma boa ductilidade e são isentas de defeitos e imperfeições na forma.

e) A aplicação da corrente pulsada melhora a estabilidade do processo, mas tende a produzir mais mordeduras na solda. Obteve-se neste modo de transferência uma menor velocidade de soldagem em comparação com as aplicações em corrente constante. Porém, a corrente média foi da ordem de 25% menor que a aplicada em corrente constante.

f) Um bom procedimento de soldagem foi estabelecido para operações na posição vertical, demonstrando na prática que a técnica keyhole pode ser aplicada para soldagem do aço 1020 nesta posição.

5 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à todo o pessoal técnico do LABSOLDA/UFSC pelas valiosas informações e colaborações prestadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, especialmente aos Eng^{os} Larry Fiory Ollé e Raul Gohr Jr.. Quanto ao financiamento, agradecimentos ao CNPq pelo fornecimento de uma bolsa de mestrado e à CAPES pela participação financeira.



6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Welding Handbook. AWS, v.2 - Welding process, eighth edition, 1991.
- [2] - Plasma-arc cutting and welding. Welding & Fabrication.1992. p. 23-55.
- [3] - SANTOS, J. F. O., QUINTINO, L. Tecnologia de soldadura: realidade atual e perspectivas futuras. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, p. 2A-25A, Caxambu-MG, dezembro 1990.
- [4] - LUCAS, W. TIG and plasma welding. England: Abington Publishing, 1990. 112 p.
- [5] - MARTIKAINEN, J. K., MOISIO, T. J. I. Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels. Welding Journal, v. 72, n. 7, p. 239s-339s, July 1993.
- [6] - GONÇALVES, V., QUINTINO, L. Development of an automated system for plasma arc welding. Report Internal - Instituto de soldadura e Qualidade, p.108-114, July 1988.
- [7] - WEBER, K. Advances in Welding Techniques using plasma and TIG for stainless steel. FWP Journal, p. 33-39, January 1991.
- [8] - LUCAS, W. Process pipe and tube welding. England: Abington Publishing, 1991. Cap. 7: TIG and plasma welding developments for fabrication of plant for the chemical, petrochemical and offshore oil and gas industries. P. 89-106.
- [9] - HALMOY, E., FOSTERVOLL, H., RAMSLAND, A. R. New applications of plasma keyhole welding. Welding in the World, v. 34, p. 285-291, 1994.
- [10] - CRAIG, E. The plasma arc process - a review. Welding Journal, v. 68, n. 2, p. 19-25, February 1988.
- [11] - TOMSIC, M., BARHORST, S. Keyhole plasma arc welding of aluminium with variable polarity power. Welding Journal, v. 63, n. 2, p. 25-32, February 1984.
- [12] - PANG, Q., PANG, T., McCLURE, J. C., NUNES, A. C. Workpiece cleaning during variable polarity plasma arc welding of aluminium. Journal of Engineering for Industry, v. 116, p. 463-466, November 1994.
- [13] – Thermal Dynamics Corporation, West Lebanon. N. 0-2031: Instruction manual. USA, 1994. 24p.
- [14] – Critérios de aceitação segundo a British Standard. BS 5500/1994 e BS 2633/1987 – seção 8.
- [15] – Deutschs Institut Für Normung. DIN EN 25817, 1992.
- [16] – ROTONDALO, R., STRUL, H. Confiabilidade Metrológica. Fundação Vanzolini. São Paulo, 1995. 180p.
- [17] – WORTH, W. E. Statistical Techniques in Thechnological Research. England; 1968. 303p.
- [18] - PAULA JÚNIOR, O. S.: Desenvolvimento e aplicação da soldagem plasma pela técnica keyhole. Dissertação de Mestrado, UFSC, abril de 1997. 111p.
- [19] - BENNETT, B. Gases for TIG and plasma arc welding. Welding & Metal Fabrication, p. 335-336, July 1990.
- [20] – Qualificação de soldagem. Código ASME, seção IX, norma QW-462, Ed. 1980, Traduzido pelo IBP.



Parâmetros/variáveis de soldagem				
Espessura do material de base	4,8 mm	6,35 mm	10 mm *	25,4 mm*
Corrente de soldagem (I) A	200	230	245	245
Vazão do Gás de Plasma (VGP) l/min	1,2	1,4	1,6	1,6
Vazão do Gás de Proteção (VGPr) l/min	9,4	9,4	9,4	9,4
Velocidade de soldagem (Vs) cm/min	20,4	19	14,5	14,5
Distância tocha-peça (DTP) mm	4,0	4,0	5,0	5,0
Diâmetro do bocal constritor mm	3,2	3,2	3,2	3,2
Ângulo do eletrodo (α)	30°	30°	30°	30°

Tabela 1 - Procedimento de soldagem estabelecido para o aço ABNT 1020. Corrente constante. * Passe de raiz.

Parâmetros/variáveis de soldagem		
Espessura do material de base	4,8 mm	6,35 mm
Corrente de pulso (Ip) A	220	240
Corrente de base (Ib) A	90	130
Tempo de pulso (tp) ms	250	250
Tempo de base (tb) ms	250	250
Corrente média (Im) A	155	185
Vazão do gás de plasma (VGP) l/min	2,0	2,0
Vazão do gás de Proteção (VGPr) l/min	9,4	9,4
Velocidade de soldagem (Vs) cm/min	17,5	16,5
Distância tocha-peça (DTP) mm	4,0	4,0
Diâmetro do bocal constritor mm	3,2	3,2
Ângulo do eletrodo (α)	30°	30°

Tabela 2 - Procedimento de soldagem estabelecido para o aço ABNT 1020. Corrente pulsada.

	Reforço na raiz				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	0,70	0,80	0,70	0,70	0,70
	0,80	0,80	0,80	0,75	0,80
	0,60	0,90	0,70	0,70	0,80
	0,70	0,90	0,70	0,75	0,70
	0,80	0,70	0,80	0,80	0,80
	0,80	0,70	0,90	0,75	0,70
	0,80	0,80	0,80	0,75	0,90
Média (\bar{x})	0,74	0,80	0,77	0,74	0,77
Desvio padrão (s)	0,07	0,08	0,07	0,03	0,07
Média total (\bar{x}_t)	0,77				

Tabela 3 - Dados levantados e calculados em relação ao reforço na raiz para análise da repetibilidade dos resultados.



Largura da solda					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	7,65	8,05	7,40	7,40	8,10
	7,85	8,10	7,50	7,50	8,10
	7,90	8,00	7,70	7,50	8,10
	7,90	7,90	7,90	7,50	8,10
	7,90	7,85	8,00	7,45	8,00
	7,90	7,80	8,10	7,50	8,00
	7,90	7,80	8,05	7,50	8,00
	7,90	7,80	8,00	7,55	8,00
	7,95	7,90	7,95	7,60	8,10
	8,00	7,90	8,00	7,70	8,05
Média (\bar{x})	7,89	7,91	7,86	7,52	8,06
Desvio padrão (s)	0,09	0,10	0,23	0,08	0,05
Média total (\bar{x}_t)	7,85				

Tabela 4- Dados levantados e calculados em relação à largura da solda para análise da repetibilidade dos resultados.

		Largura da solda	Reforço na raiz
Varição entre amostras	Se ²	0,395	0,00475
Varição Residual	Sr ²	0,0879	0,0282
	Fcal	4,49	0,1684
	Fcrit	6,42	9,15

Tabela 5- Dados calculados para aplicação do teste F na análise da repetibilidade dos resultados

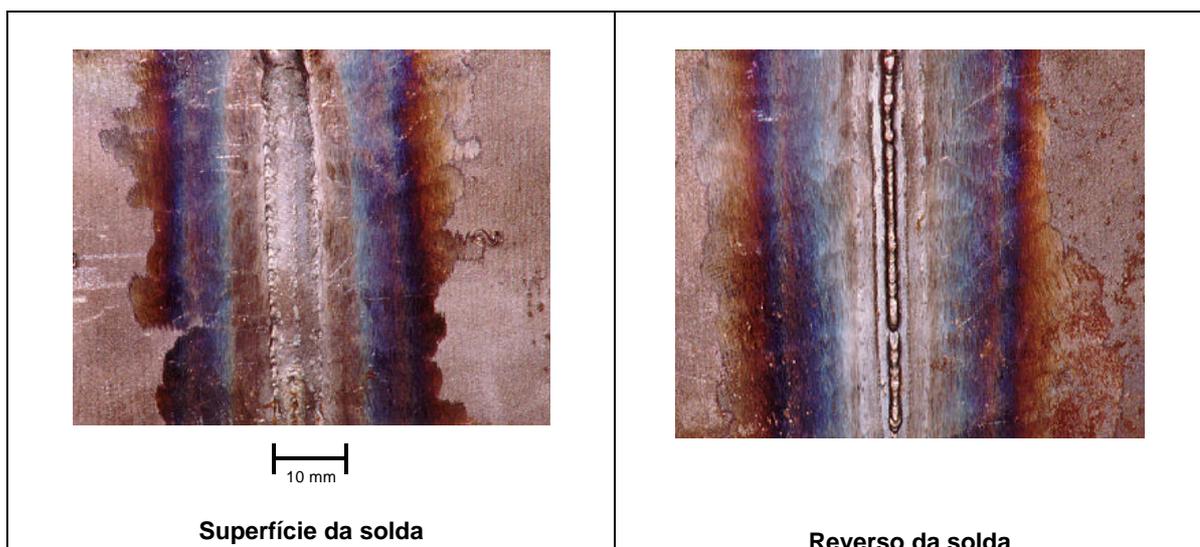


Figura 1 - Aspecto visual da solda. Gás de plasma: Argônio a 1,2 l/min.