

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO PELO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW POR CURTO-CIRCUITO CONTROLADO (CCC)

Helen Rodrigues Araújo

Petrônio Luiz Cabral de Carvalho Clemente Fernandes

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
helen.araujo@ufpe.br
petronio.cabral@ufpe.br

Luís Henrique Rodrigues Apolinário

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
luis.apolinario@ufpe.br

André de Albuquerque Vicente

Universidade de São Paulo (LAREX), Avenida Prof. Mello Moraes, 2463 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-030
andre.vicente@alumni.usp.br

Tiago Felipe de Abreu Santos

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
tiago.felipe@ufpe.br

Resumo. A classe de aços inoxidáveis de matriz austenítica é amplamente utilizada na indústria devido a combinação entre a resistência à corrosão e o desempenho mecânico apresentados por estes. A soldagem desse material é muito difundida e demandada na indústria, como exemplo, a aplicação dos processos de soldagem em vasos de pressão e tubulações. Visando a melhoria de produtividade, as aplicações utilizando o processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) com a tecnologia de curto-circuito controlado apresenta-se como uma alternativa prática e viável para substituição aos processos usuais durante a execução dos passes de raiz. Nesse projeto foram definidas as condições de soldagem que viabilizassem a aplicação deste processo na soldagem do aço inoxidável austenítico AISI 304, utilizando a tecnologia de curto-circuito controlado pelo mecanismo de transferência por controle da tensão superficial. Foram avaliados os aspectos geométricos da junta soldada e a diluição medida, em relação à área depositada, foi de 11,1%. Foi verificado o desempenho mecânico das juntas, através da realização dos ensaios de dobramento e microdureza. As juntas soldadas apresentaram-se isentas de descontinuidades após a realização do dobramento à 180° dos corpos de prova de face e raiz. A região da zona fundida apresentou dureza média de 211 HV_{0,2/15}.

Palavras chave: Soldagem. Curto-circuito Controlado. Aço Inoxidável Austenítico. Desempenho Mecânico

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço das demandas industriais por maiores níveis de produtividade e qualidade, os processos de soldagem estão em constante desenvolvimento. O processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) apresenta-se como uma alternativa eficiente entre os processos de soldagem disponíveis no ambiente fabril. Esse processo de soldagem, no qual a união é produzida pela fusão por arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico consumível e a peça de trabalho, permite o monitoramento das características dinâmicas do processo e o aumento expressivo da velocidade de soldagem, além de permitir a união em todas as posições de soldagem, produzindo cordões isentos de escória (Chaudhary e Choudhary, 2017).

Durante a soldagem GMAW, pode ser observada a ocorrência de três principais modos de transferência metálica, sendo eles: curto-circuito, globular e goticular projetada (spray). As forças eletromagnéticas em função da distribuição do fluxo de corrente, o arraste proveniente do fluxo do gás de proteção, a variação da tensão superficial e da própria força gravitacional (em função da posição de soldagem) são grandezas intrínsecas a tais mecanismos de transferência. O que vai conduzir às particularidades que cada tipo de modo de transferência apresenta é a forma como essas grandezas físicas se evidenciam no ciclo de formação e deposição da gota metálica. Para controlar cada modo de deposição, é preciso realizar a correta seleção dos parâmetros tais como corrente, tensão, velocidade de alimentação, entre outros (Murugan e Parmar, 1994; Chaudhary e Choudhary, 2017).

O processo GMAW utilizando o modo de transferência metálica por curto-circuito convencional possui limitações, em decorrência das variações abruptas de tensão e corrente, em determinados momentos do ciclo. Por consequência,

efeitos negativos são observados na junta soldada, como por exemplo a geração excessiva de respingos e fumos. Esses problemas causam consequências negativas para a qualidade da solda produzida, dificultando sua aplicação em situações que exigem juntas soldadas que apresentem bom acabamento superficial e especificações dimensionais rigorosas (Norrish e Cuiuri, 2014; Krishnan, Kulkarni e De, 2016).

Com o avanço da eletrônica empregada nas fontes de soldagem, foram desenvolvidos comandos eletrônicos para o controle das limitações apresentadas pelo processo GMAW convencional, sendo a tecnologia do curto-circuito controlado (CCC) um desses processos derivativos. Algumas empresas desenvolveram diferentes técnicas para o controle do processo de transferência por curto-circuito, variando a forma de detecção e os sinais de resposta durante o ciclo de formação da gota metálica na ponta do eletrodo consumível. No presente trabalho, a tecnologia de curto-circuito controlado utilizada foi a de transferência metálica controlada pela variação da tensão superficial. A fonte monitora a variação da tensão superficial da gota – utilizando os recursos eletrônicos – durante o contato com poça de fusão e, através de um inversor de alta frequência denominado tecnologia de controle do formato da onda de corrente e tensão (*Waveform Control Technology*), o formato da onda de saída da corrente é controlado, fazendo ajustes nos valores de corrente em todo o ciclo para que a transferência do metal fundido seja executada da forma mais suave possível, evitando a formação de respingos (Adi, *et al.*, 2016).

O material utilizado na pesquisa foi um aço inoxidável AISI 304, de matriz austenítica que apresenta excelentes níveis de resistência à corrosão e capacidade mecânica. É o tipo amplamente utilizado pela indústria e, conseqüentemente, bastante comercializado. Os aços inoxidáveis da série 300 são compostos por uma liga ternária de ferro-cromo-níquel, na qual o níquel atua como o promotor da fase austenita à temperatura ambiente, fator que contribui para melhorar a tenacidade do material. Essa classe de aço é paramagnética e não são endurecíveis por tratamentos térmicos, apenas por trabalho à frio (Chiaverini, 1988; ASM International, 1993; Copaert, 2008).

O objetivo deste trabalho foi determinar os parâmetros de aplicação do processo de soldagem e avaliar o comportamento mecânico, por meio dos ensaios de microdureza e dobramento, das juntas soldadas em aço inoxidável austenítico AISI A304 pela aplicação do processo GMAW pela tecnologia de curto-circuito controlado com mecanismo de transferência pelo controle da tensão superficial. A aplicação deste estudo disponibiliza uma maior gama de informações sobre este processo de soldagem, aumentando o campo de abrangência do mesmo e tornando-o mais acessível, além de conhecer os efeitos destas aplicações em aços de grande relevância dentro da classe dos austeníticos.

2. GMAW POR CURTO-CIRCUITO CONTROLADO

A maneira como a gota metálica é formada e transferida para a poça de fusão é a principal diferença entre o GMAW convencional e o CCC. O processo do curto-circuito controlado pelo mecanismo de transferência por controle da tensão superficial pode ser sintetizado em seis etapas, conforme apresentado na Figura 1. A primeira etapa (indicação “A” da Figura 1) consiste numa corrente nominal denominada de corrente de base (*background current*), que é o valor de corrente inicial antes da aproximação do eletrodo à poça. A segunda etapa (indicação “B” da Figura 1) é caracterizada pelo tempo de formação da gota na ponta do eletrodo (*ball time*), momento que o sensor verifica a variação da tensão superficial da gota devido ao contato da mesma com a poça de fusão e automaticamente decresce a corrente, diferindo do processo de curto-circuito convencional onde ocorreria um acréscimo significativo na corrente (Dunder, *et al.*, 2005; Nadzam, 2014; Adi, *et al.*, 2016).

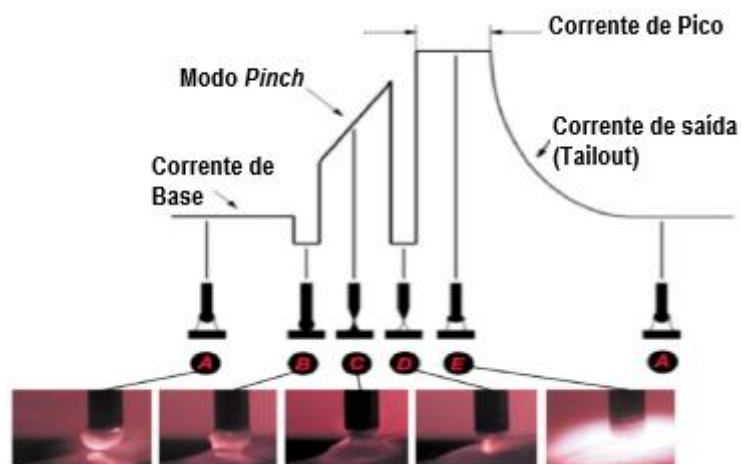


Figura 1. Oscilograma da corrente na transferência por curto-circuito controlado pela tecnologia CCC com mecanismo de transferência pelo controle da tensão superficial (Nadzam, 2014)

A terceira etapa (indicação “C” da Figura 1) é denominada modo *Pinch (Pinch Mode)*, onde a corrente eleva-se a um nível adequado, mas não máximo, para que as forças eletromagnéticas favoreçam a diminuição da seção transversal da gota na interface de contato com o eletrodo. A quarta etapa (indicação “D” da Figura 1) consiste na leitura dos sensores da variação de tensão em função do tempo, quando a taxa atinge um valor específico, o sensor detecta que o destacamento da gota será concluído e ao mesmo tempo ele reduz o valor da corrente no momento crítico do destacamento, suavizando o processo de transferência e isso previne a geração de respingos. Caso contrário, a separação brusca, sem atenuação da corrente, geraria a explosão da gota metálica, situação recorrente durante aplicação do curto-circuito convencional (Dunder, *et al.*, 2005; Nadzam, 2014; Adi, *et al.*, 2016).

A quinta etapa (indicação “E” da Figura 1) consiste basicamente na retomada da corrente ao seu valor máximo (*Peak Current*) para criar uma deposição uniforme e garantir que a gota não retorne para o eletrodo. A sexta etapa, consiste na diminuição gradual da corrente, que estava em níveis máximos, para valores da corrente de base. A forma como esse decréscimo é feito, é controlado e é denominado de corrente de saída (*Tailout*). Com isso, tensão e corrente retornam, novamente, aos valores iniciais para reiniciar o processo de formação de uma nova gota de material de adição (Dunder, *et al.*, 2005; Nadzam, 2014; Adi, *et al.*, 2016).

3. MATERIAS E MÉTODOS

A aplicação do processo de soldagem e os ensaios de caracterização foram todos realizados no Instituto Nacional de Revestimento e Tecnologias de Materiais (INTM) na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

O aço utilizado foi o inoxidável de matriz austenítica AISI A304 que tem sua composição descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química do aço inoxidável aplicado AISI A304

COMPOSIÇÃO (%)												
Espec	Fe	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Co
AISI A304	72,1	0,03	1,1	0,4	0,001	0,033	8,030	17,66	0,17	0,24	0,003	0,196

Para definir a geometria do chanfro, foi escolhida um formato geralmente aplicado à união de tubulações e vasos de pressão: o chanfro “V”. As dimensões adotadas seguem a norma ASME B31.3 (2014), item 328.4. Após a fabricação das chapas com sua respectiva geometria de chanfro, foi iniciada a soldagem, cuja fonte utilizada para realizar o processo foi uma Power Wave S350 acoplado com um alimentador simples modelo Power Feed 84, ambos unidos ao módulo de soldagem avançado de controle de curto-circuito por transferência metálica controlada pela variação da tensão superficial, conhecida por STT® (*Surface Tension Transfer*).

O arame sólido ER308LSi com diâmetro de 1,0 mm, foi escolhido seguindo as recomendações estabelecidas pela norma ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), BPVC (*Boiler and Pressure Vessel Code*) divisão IX (2017), que estabelece padrões normativos para qualificação de procedimentos e operadores de soldagem e brasagem. A Tabela 2 indica a composição desse material de adição.

Tabela 2. Composição química do metal de adição

COMPOSIÇÃO (%)												
Espec	Fe	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	N
Arame ER308LSi	67,986	0,016	1,990	0,810	0,001	0,028	9,340	19,550	0,080	0,100	0,010	0,089

Durante a execução dos cordões, foi aplicada uma vazão de 15 L/min para o gás de proteção com composição, em volume, de 98% de argônio e 2 % de dióxido de carbono (CO₂). Segundo os autores Scotti e Ponomarev (2014) a presença de um percentual de gás oxidante, CO₂, na mistura deve-se, majoritariamente, pelo fato de que os aços inoxidáveis são de baixa reatividade e essa condição dificulta a ionização do gás e consequentemente a estabilização do arco. Portanto, o CO₂ garante essa melhoria na reatividade para estabilizar o arco elétrico.

Após a fabricação da junta, executada conforme parâmetros estabelecidos para o estudo, tais quais correntes de base, de pico e de saída, abertura de raiz, distância bocal peça e velocidade de alimentação do arame, foram realizados cortes transversais ao eixo dos cordões para retirada de parcelas da junta, a fim de viabilizar posterior preparação de amostras e corpos de prova. Posteriormente, estes corpos de prova foram embutidos em baquelite para facilitar manuseio e o acoplamento no equipamento para medição de microdureza. Para a análise metalográfica torna-se necessária uma superfície livre de riscos e imperfeições, para isso, as amostras foram lixadas com uma progressão de granulometria das lixas d’água na seguinte ordem: 180, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500. Na sequência, realizou-se o polimento com pasta abrasiva de diamante de 3 e 1 µm. Para visualização da junta no estereoscópio, foi realizado o ataque eletroquímico com solução de Ácido Oxálico a 10%, utilizando a tensão de 3V, com amostra imersa em solução por 75s.

Seguindo as recomendações da ASTM E 384-17 (2017), foram feitas as medições de microdureza Vickers nas diferentes regiões da seção transversal da junta contemplando os três passes, zona fundida (ZF), zona termicamente

afetada (ZTA) e no metal base. Para o ensaio de dobramento, quatro corpos de prova foram usinados seguindo as instruções do QW-161 na norma ASME IX (2017) e item 8 da norma ASTM E190-14 (2014). O dobramento recomendado para este tipo de junta soldada é o de 180°.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A parametrização do processo GMAW por curto-circuito controlado foi baseada em estudos anteriores como Adi, *et al.* (2016), Norrish e Cuiuri (2014), Dunder, *et al.* (2005) e Stava (2001) que apresentavam as variáveis corrente de base, corrente de pico e *Tailout* como fundamentais à aplicação do processo. Para definição dos valores adequados destas variáveis foram consultadas também recomendações normativas e dos fabricantes das fontes de soldagem para aplicações em aços inoxidáveis, com o chanfro produzido em “V” e em função do material do metal de adição e seu respectivo diâmetro, os quais indicavam valores de base para velocidade de alimentação, de abertura de raiz, a corrente de base, corrente de pico e *Tailout*.

Experimentos iniciais permitiram a definição dos parâmetros de entrada fundamentais relacionados à tecnologia empregada. Para a correta programação da fonte de energia utilizada na aplicação do processo GMAW por curto-circuito controlado, adotou-se como critérios de avaliação a penetração adequada do primeiro passe (raiz), o devido preenchimento do chanfro, ausência de defeitos entre passes e bom acabamento do cordão. Na execução dos experimentos os valores associados às variáveis foram alternadamente modificados para o cumprimento dos critérios estabelecidos, onde para cada tipo de resposta insatisfatória encontrada foi alterada uma variável para ajuste da qualidade dos cordões produzidos. A Tabela 3 apresenta os parâmetros adotados em cada experimento tais como distância bocal-peça (DBP), abertura da raiz, os valores de entrada no equipamento de soldagem (corrente de base, corrente de pico e de saída), além dos valores de resposta da fonte (tensão e corrente média), além disso os resultados obtidos nas juntas produzidas foram descritos na coluna de observações da Tabela 3.

Tabela 3. Dados de parametrização das condições de aplicação do processo CCC

Experimento	Vel. de alimentação (in/min)	DBP Raiz/Ench ¹	Abertura de raiz	Corrente de Base	Corrente de Pico	Tailout	Corrente média (A)	Tensão média (V)	Observações
1	126	5,4/6,9	1	80	260	4	82	14,7	sem penetração / cordão mais largo
2	126	5,4/6,9	1	68	80	2	67	14,2	sem penetração no 1º passe
3	126	5,4/6,9	1	68	80	0	64	14,5	sem penetração no 1º passe
4	126	5,4/6,9	1	66	71	4	76	13,3	sem penetração no 1º passe
5	158	5,4/6,9	1	100	71	5	99	14,7	Penetração adequada / erro de ajuste fonte
6	158	5,4/6,9	1	100	71	4	101	14,3	Penetração adequada / defeito entre passes
7	158	5/6,5	1	100	71	4	100	14,5	Pouca penetração / erro de posicionamento
8	177	5/6,5	1	100	71	4	101	14,0	Sem penetração / abertura inadequada
9	158	3,3/3,3	1,7	100	71	4	100	15,1	Penetração adequada / defeito entre passes
10	158	3,3/3,3	1,7	100	71	4	101	15,0	Penetração adequada / sem defeitos entre passes / bom acabamento

¹Raiz/Ench = Para passes de Raiz / Enchimento

As observações descritas foram baseadas nos critérios de avaliação anteriormente estabelecidos. Por exemplo, no experimento 4 foi evidenciada a ausência de penetração na face da raiz, influenciada por baixos valores de corrente de base e de alimentação. Após a alteração destes parâmetros (velocidade de alimentação e corrente de base), foi observado uma melhora discreta da penetração, conforme apresenta a Figura 2 (a), mas ainda não adequada aos critérios, verificando a parcela de influência da distância bocal-peça (DBP) e abertura de raiz, sendo estas aumentada e reduzida respectivamente. A partir dos experimentos 8, optou-se por reduzir a DBP até atingir valores de 3,3 mm e aumentar a abertura da raiz até 1,7 mm.

O experimento 10 apresentou os melhores aspectos visuais, conforme ilustra a Figura 2 (b), conforme os critérios estabelecidos, e ausência de defeitos superficiais e entre passes, adotando uma limpeza mecânica no intervalo de

deposição dos passes. Utilizando os mesmos parâmetros do experimento 10, uma junta de 300 mm de comprimento foi produzida para fabricação dos corpos prova e realização dos ensaios e posteriores análises.

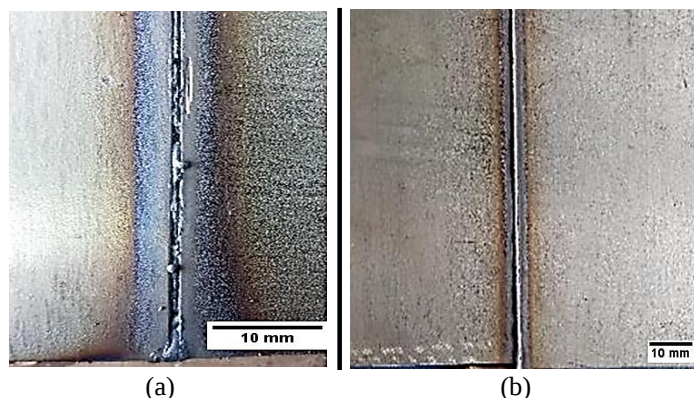


Figura 2. Resultado do aspecto superficial da face da raiz das juntas soldadas conforme experimentos 7 (a) e 10 (b) para definição dos parâmetros correntes de base, de pico e de saída

A análise da geometria da junta soldada foi realizada por meio das macrografias. Os aspectos geométricos avaliados foram: penetração de raiz, altura de reforço e diluição. A Tabela 4 resume os valores relevantes para a geometria da junta e Figura 3 (a) detalha estas medidas.

Tabela 4. Características quantitativas da geometria do cordão soldado

Penetração Raiz (1 ^a)	Reforço Intermediário (2 ^a)	Reforço Passe final (3 ^a)	Largura do reforço	Diluição
1,5 mm	1,3 mm	2,5 mm	9,5 mm	11,1 %

Pequenas distorções angulares foram visualizadas nas amostras produzidas, por consequência do aporte térmico inerente ao processo de soldagem por arco elétrico, porém, tais distorções não tiveram influência relevante no preenchimento da junta ou sobre a penetração do passe de raiz. Outro aspecto de grande relevância aos critérios estabelecidos foi a penetração do metal de adição na abertura da raiz, onde foi avaliado o critério estabelecido pela norma ISO 5817 (2007), para esse tipo de chanfro em “V”. A partir da imagem obtida na macrografia da seção transversal, conforme ilustra a Figura 3 (a), indicando a quantidade de passes depositados, foi medida uma penetração com altura de 1,5 mm, caracterizando-se uma penetração aceitável, já que o metal fundido depositado preenche toda a área referente ao passe de raiz, evitando a formação de descontinuidades e caracterizando a correta união entre as partes.

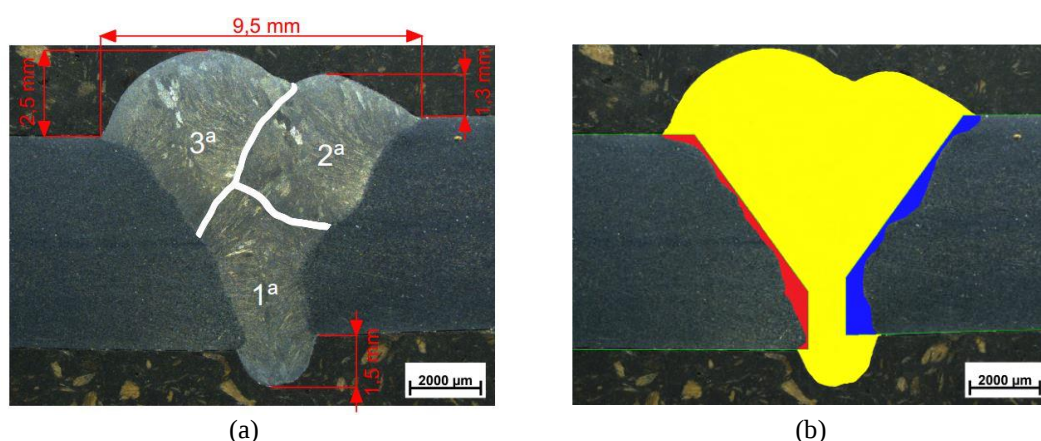


Figura 3. Macrografia da junta soldada do aço inoxidável austenítico AISI 304 pelo processo GMAW por CCC. (a) indicando os passes depositados e (b) tratamento de cores para realização do cálculo da diluição

Foi constatado que o reforço oriundo dos passes de preenchimento, conferiu ao cordão medidas de 1,3 mm no passe intermediário (2^a) e 2,5 mm no último passe (3^a) do cordão (medidas realizadas a partir da superfície superior do metal de base). Segundo Shoeb, *et al.* (2013) para garantir eficiência na execução de soldas para linhas de produção, o reforço não deve exceder o valor de 20% em relação à espessura da chapa, pois acarreta em desperdício de material de adição e

aumento de retrabalho para remoção desse excesso. O reforço do passe intermediário representa um percentual de 20,5% e o último passe representa 39,4%, ambos em relação à espessura da chapa que é 6,35 mm. O passe final excedeu a taxa de eficiência, devido à ausência de tecimento somado ao fato de que a posição da tocha é perpendicular ao chanfro e o cordão produzido foi depositado sobrepondo o passe intermediário e o passe de raiz (Scotti e Ponomarev, 2014). Um reforço excessivo, apesar de não representar uma consequência prejudicial às propriedades mecânicas da junta, gera um custo desnecessário de tempo e insumos para remoção deste excesso, além da perda desnecessária de material de adição.

A largura do reforço foi medida no valor de 9,5 mm e a contribuição dos passes para o preenchimento na largura foi uniforme, ou seja, cada passe compreendeu aproximadamente 50% do comprimento total evidenciando que o arco não sofreu desvios consideráveis durante a soldagem.

Outra análise realizada foi a determinação da diluição em uma junta heterogênea, utilizando a mensuração através do *software* livre ImageJ, foi possível estimar a diluição no metal base. Os valores apresentados na Tabela 5 compreenderam os seguintes resultados: a zona diluída que são as parcelas destacadas na Figura 3 (b) nas cores azul e vermelho, representando o valor, em área somada, de 4,6 mm². A zona fundida, que compreende a soma das três áreas (azul, vermelho e amarelo) apresentando o valor de área de 41,6 mm². A taxa percentual de diluição que corresponde à razão entre a zona diluída e a zona fundida, em percentual, resultou em 11,1%. Conforme Lippold (2015), em geral, a aplicação da maioria dos processos de soldagem visa manter a diluição abaixo de 50%, logo a diluição apurada está em níveis adequados. Uma das vantagens apontadas por autores como Stava (2001), Deruntz (2003), Adi, Ismar e Petar (2016) relativa à aplicação do processo de curto-circuito controlado é, exatamente, a redução do aporte térmico conferido ao sistema, o que pode ter influenciado neste valor de diluição encontrado.

Tabela 5. Resumo dos valores considerados no cálculo de diluição

	Amarelo	Vermelho	Azul
Área (mm ²)	36,7	1,8	2,8
Diluição	11,1%		

A partir da realização do ensaio de microdureza Vickers foi possível visualizar a distribuição dos valores de microdureza nas diversas regiões da junta soldada. Nos resultados obtidos, os valores da ZF foram superiores, em média, aos obtidos na ZTA e metal base. Outro fato observado é que oscilações de microdureza ocorreram no intervalo de indentações localizados dentro da ZF, isso pode ser explicado pelo fato do cordão de solda apresentar três passes sobrepostos, com isso oscilações de aporte térmico durante a soldagem podem ter contribuído para tais variações. A Tabela 6 apresenta os valores médios obtidos em cada região da junta.

Tabela 6. Resumo dos valores médios de microdureza

MB	ZTA	ZF
(204 ± 6) HV _(0,2/15)	(202 ± 10) HV _(0,2/15)	(211 ± 10) HV _(0,2/15)

No processo de solidificação presente nos aços inoxidáveis austeníticos, como evidenciado nos trabalhos dos autores Thomas (1978) e Hauser e Vanecho (1982), a presença da fase ferrita na microestrutura da zona fundida favorece o aumento de resistência em relação à ZTA e a MB, em condição ambiente. De acordo com resultados obtidos por Padilha e Guedes (1994), possíveis variações entre os valores de microdureza medidos na zona fundida, podem ser explicadas pelas diferentes morfologias da fase ferrita comumente formadas após a solidificação do aço inoxidável austenítico.

No ensaio de dobramento, buscou-se analisar, de forma qualitativa, a ductilidade do material. Para juntas soldadas foi realizado o ensaio de 180° conforme normas ASME IX (2017) e ASTM E190-14 (2014). A Figura 4 apresenta os corpos de prova após o ensaio de dobramento e submetido ao ensaio não destrutivo de líquido penetrante visando avaliar a presença de descontinuidades superficiais.

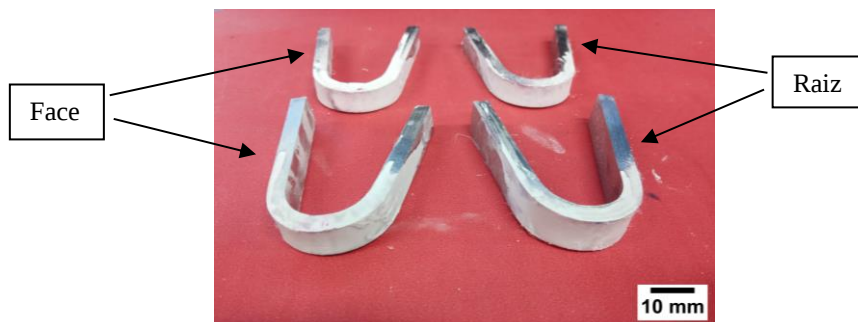


Figura 4. Corpos de prova após o ensaio de dobramento após ensaio não destrutivo de líquido penetrante

De maneira geral todos os corpos de prova apresentaram resultados satisfatórios, pois os critérios avaliados foram a presença de descontinuidades na zona tracionada do corpo de prova de acordo com as recomendações da QW-163 da ASME IX (2017), a qual informa que a região tracionada não pode possuir defeitos maiores que 3 mm. A aplicação do líquido penetrante mostrado na Figura 4, não revelou fissuras ou trincas, tanto na face do reforço quanto da raiz de todos os corpos de prova. Esse ensaio evidenciou que o processo por curto-circuito controlado manteve as características da especificação de uso dos aços inoxidáveis austeníticos segundo os critérios estabelecidos pelas normas associadas, conservando além das propriedades mecânicas (dureza), sua ductibilidade por ensaio de dobramento.

5. CONCLUSÕES

O estudo avaliou a parametrização pelo processo GMAW por curto-circuito controlado (CCC) pelo mecanismo de transferência metálica por controle da tensão superficial no aço inoxidável austenítico AISI 304 e suas correlações com aspectos geométricos e algumas propriedades mecânicas das juntas soldadas. Dentre as várias combinações de parâmetros, a condição relacionada ao experimento 10 se mostrou satisfatória, no qual foram adotados os valores de 158 in/min para velocidade de alimentação do arame, 3,3 mm para distância bocal-peça (DPB), 1,7 mm de abertura de raiz, 100 A de corrente de base, 71 A de corrente de pico e *Tailout* de 4, sendo aquela onde os aspectos geométricos e propriedades mecânicas foram avaliados.

O processo GMAW curto-circuito controlado com a tecnologia de controle da tensão superficial garantiu uma boa integridade da junta, fatores que resultaram em uma união isentas de descontinuidades superficiais, fator importante para linhas de produção que precisam atender critérios de controle da qualidade da deposição. A diluição verificada pelo processo foi de 11,1%, associado ao baixo aporte térmico característico da aplicação deste processo. Os ensaios de dobramento em 180° foram realizados, avaliando tanto reforço quanto à raiz, sendo aprovados por critérios normatizados, não apresentando descontinuidades nas juntas soldadas. Portanto, a aplicação do processo de soldagem GMAW com curto-circuito controlado não compromete a ductibilidade e tenacidade característica dos aços inoxidáveis austeníticos.

Em relação à microdureza da junta soldada, a microestrutura formada na zona fundida após a aplicação da soldagem, pode ter influenciado para que esta região apresentasse valor médio de microdureza Vickers de 211 HV_{0,2/15} em condições operacionais à temperatura ambiente, resultando em valores médios superiores aos apresentados pela zona termicamente afetada e pelo metal base.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FACEPE, ao CNPq, a CAPES pelo apoio financeiro ao projeto e à ANP e à FINEP pelo financiamento da infraestrutura utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Adi, P.; Ismar, H.; Petar, T., 2016. "Advantages of MAG-STT Welding Process for Root Pass Welding in the Oil and Gas Industry". *TEM Journal*, v. 5, n. 1, p. 76-79.
- American Society of Mechanical Engineers, 2014. "ASME B31.3 Process Piping Code for Pressure Piping". *The American Society of Mechanical Engineers*, New York.
- American Society of Mechanical Engineers., 2017. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX - Welding, Brazing and Fusing Qualification". *The American Society of Mechanical Engineers*, New York.
- ASM International, 1993. *ASM Handbook: Properties and Selection - Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. United States.
- ASTM International, 2014. "Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds". *ASTM International*, West Conshohocken.
- ASTM International, 2017. "Test Method for Microindentation Hardness of Materials". *ASTM International*, West Conshohocken.
- British Standard, 2007. *ISO 5817: 2007 - Welding and Fusion-Welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys*. United Kingdom.
- Chaudhary, K.; Choudhary, T. A, 2017. "Study on Metal Transfer Mechanism in Gas Metal Arc Welding". *IJSRSET*, v. 3, n. 8, p. 13.
- Chiaverini, V., 1988. *Aços e Ferros Fundidos*. ABM, São Paulo-SP, 6ª edição.
- Copaert, H., 2008. *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. Blucher, São Paulo, 4ª edição.
- Deruntz, M. B. D., 2003. "Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry". *Journal of Industrial Technology*, v. 19, n. 4, p. 8.
- Dunder, D. M.; Radića, S.; Travnik, N., 2005. "MONITORING OF MAIN WELDING PARAMETERS AT STT WELDING PROCESS". Trends in the Development of Machinery and Associated Technology. In *Proceedings of 9TH INTERNATIONAL RESEARCH/EXPERT CONFERENCE*. Turkey.

- Hauser, D.; Vanecho, J. E., 1982. "Effects of ferrite content in austenitic stainless steel welds". *Welding Journal*.
- Krishnan, S.; Kulkarni, D. V.; De, A., 2016. "Multipass pulsed current gas metal arc welding of P91 steel". *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 21, n. 3, p. 171–177.
- Lippold, J. C., 2015. *Welding Metallurgy and Weldability*. John Wiley & Sons Inc, New Jersey.
- Murugan, N.; Parmar, R. S., 1994. "Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 41, n. 4, p. 381–398.
- Nadzam, J., 2014. *Gas Metal Arc Welding Guidelines*. Lincoln Electric.
- Norrish, J.; Cuiuri, D., 2014. "The controlled short circuit GMAW process: A tutorial". *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 1, p. 86–92.
- Padilha, A. F.; Guedes, L. C., 1994. *Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades*. HEMUS, São Paulo.
- Scotti, A.; Ponomarev, V., 2014. *Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho*. Artliber, São Paulo, 2ª edição.
- Shoeb, M.; Paryez, M.; Kumari, P., 2013. "Effect of mig welding input process parameters on weld bead geometry on HSLA steel". *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 5, n. 1, p. 200–212.
- Stava, E. K., 2001. "Waveform Control Speeds Root Pass". *Welding Design & Fabrication*, v. 74, n. 2, p. 39.
- Thomas, R. G., 1978. "The Effect of S-Ferrite on the Creep Rupture Properties of Austenitic Weld Metals". *WELDING RESEARCH SUPPLEMENT*, v. 82, p. 81-86.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

EVALUATION OF MECHANICAL PERFORMANCE OF JOINTS IN STAINLESS STEEL AUSTENITIC PRODUCED BY CONTROLLED SHORT-CIRCUIT GMAW

Helen Rodrigues Araújo

Petrônio Luiz Cabral de Carvalho Clemente Fernandes

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901

helen.araujo@ufpe.br

petronio.cabral@ufpe.br

Luís Henrique Rodrigues Apolinário

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901

luis.apolinario@ufpe.br

André de Albuquerque Vicente

Universidade de São Paulo (LAREX), Avenida Prof. Mello Moraes, 2463 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-030

andre.vicente@alumni.usp.br

Tiago Felipe de Abreu Santos

Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901

tiago.felipe@ufpe.br

Abstract. The austenitic stainless steel class is widely used in the industry due to the combination of corrosion resistance and mechanical performance. The welding of this material is very widespread and demanded in the industry, as an example, the application of welding processes in pressure vessels and pipes. In order to improve productivity, applications using the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process with controlled short-circuit technology are presented as a practical and viable alternative to replace the usual processes during the execution of root passes. In this project, the welding conditions were defined to enable the application of this process in the welding of AISI 304 austenitic stainless steel, using the short-circuit technology with the transfer mechanism controlled by the surface tension variation. The geometric aspects of the joint were evaluated and the measured dilution, in relation to the deposited area, was 11.1%. The mechanical performance of the joints was verified by carrying out the bend and microhardness tests. The joints were free from discontinuities after the 180° bend of the face and root specimens. The melted zone region presented an average hardness of 211 HV_{0.2/15}.

Keywords: Welding, controlled short circuit, austenitic stainless steel, mechanical performance

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.