

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO CHANFRO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM A36 SOLDADO COM O PROCESSO MIG/MAG

Jacilene de Jesus Costa, jacilenecostha@hotmail.com¹
Paulo Victor Cunha Caetano, paulocaetano.pc@gmail.com¹
Waldemir dos Passos Martins, waldemir@ifma.edu.br¹
Carmem Célia Francisco Nascimento, carmemfn@ifma.edu.br¹
Valdemar Silva Leal, valdemar@ifma.edu.br¹

¹IFMA – Instituto Federal do Maranhão/Campus Monte Castelo. Av. Getúlio Vargas, 04. CEP:65030-005.

Resumo: A prevenção de deformações e descontinuidades em juntas soldadas é de fundamental importância e se deve ao fato das tolerâncias dimensionais e geométricas estarem cada vez mais estritas nas especificações de projetos de estruturas soldadas, motivando os especialistas em soldagem a desenvolverem cada vez mais processos estáveis com vistas a garantias de solda de qualidade. Desta forma, um chanfro bem definido é de primordial importância para garantir a integridade das estruturas soldadas e em particular aquelas fabricadas de aços, uma vez que a maioria desses materiais quando submetidos a soldagem tornam-se suscetíveis ao surgimento de deformações e trincas. Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo da influência da geometria do chanfro nas propriedades metalúrgicas, geométricas e comportamento mecânico de um aço estrutural ASTM A36 soldado pelos processos MIG/MAG. Foi utilizado o arame sólido AWS ER70S-6 SFA 5.18 cobreado de diâmetro 1,2 mm, com gás de proteção a mistura gasosa Ar+25%CO₂. Os corpos de prova foram soldados com dois tipos de chanfro diferentes, em "V" e em "X", e as propriedades analisadas foram o dobramento, a microestrutura, microdureza, penetração e largura dos cordões. Com este estudo foi possível determinar a influência do tipo de chanfro utilizado e a previsão da integridade da junta soldada de aços estruturais, quanto ao surgimento de deformações e descontinuidades.

Palavras-chave: mig/mag, chanfro, propriedades mecânicas, geometria do cordão

1. INTRODUÇÃO

A quantidade de carbono presente no aço define sua classificação. Os aços de baixo carbono possuem um máximo de 0,3% deste elemento e apresentam grande ductilidade. São bons para o trabalho mecânico e soldagem, não sendo temperáveis, utilizados na construção de edifícios, pontes, navios, automóveis, dentre outros usos. Na construção de estruturas metálicas, o interesse maior recai sobre os chamados aços estruturais de média e alta resistência mecânica, termo designativo de todos os aços que, devido à sua resistência, ductilidade e outras propriedades, são adequados para a utilização em elementos da construção sujeitos a carregamento. Os principais requisitos para os aços destinados à aplicação estrutural são: elevada tensão de escoamento, elevada tenacidade, boa soldabilidade, homogeneidade microestrutural, susceptibilidade de corte por chama sem endurecimento e boa trabalhabilidade em operações tais como corte furação e dobramento, sem que se originem fissuras ou outros defeitos (POLINSKI, PARIS, 2014).

Desta forma, a prevenção de deformações e descontinuidades em juntas soldadas é de fundamental importância e se deve ao fato das tolerâncias dimensionais e geométricas estarem cada vez mais estreitas nas especificações de projetos de estruturas soldadas, motivando os especialistas em soldagem a desenvolverem cada vez mais processos estáveis com vistas a garantias de solda de qualidade. Desta forma, um chanfro bem definido é de primordial importância para garantir a integridade das estruturas soldadas, uma vez que a maioria destes materiais quando submetidos a soldagem tornam-se suscetíveis ao surgimento de deformações e trincas. Neste sentido, mesmo se tratando de um tema bem conhecido, este trabalho apresenta uma revisão da influência da geometria do chanfro nas propriedades mecânicas de um aço estrutural ASTM A36 soldado com o processo MIG/MAG mecanizado. Os corpos de prova foram soldados com os chanfros de acordo com a norma AWS D1.1, e ensaio de dobramento pela norma QW-161.2 e suas propriedades mecânicas analisadas. Com este estudo verificou-se a influência do tipo de chanfro utilizado nas propriedades metalúrgicas e geométricas, resistência mecânica e a previsão da integridade da estrutura soldada.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O AÇO ASTM A36

Apresentando boa soldabilidade, o aço A36 possui pequenas quantidades de carbono. Sendo composto principalmente (99%) de ferro, sua resistência e usinabilidade são baixas. Possui uma superfície rugosa, sua resistência em relação a tração se encontra entre 400 MPa e 550 MPa, trabalhando com um máximo de elasticidade de 250 MPa, sendo recomendado pela norma não ultrapassar um alongamento de 20% de sua seção. Geralmente utilizado na forma de barras, cantoneiras e vigas, o aço A36 é mais encontrado no mercado em forma de chapas, essas as quais variam de 4,76 a 15 mm. Sendo utilizadas especialmente como material estrutural, decorrente de sua leveza, apresenta propensão de oxidação alta se não houver revestimento (CIMM, 2016).

2.1. Soldagem dos aços ASTM A36

No Processo de Soldagem MIG/MAG (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é estabelecido um arco elétrico entre um eletrodo consumível nu alimentado continuamente e o metal de base, sob a proteção constante de uma atmosfera gasosa (gás de proteção). A atmosfera gasosa pode ser de gás inerte, ativo ou uma mistura dos dois (INFOSOLDA, 2016). A representação do processo MIG/MAG é apresentada esquematicamente na Fig. (1).

A soldagem MIG/MAG possui características muito importantes, dentre os métodos existentes para soldagem de chapas. Grande capacidade de penetração, alta taxa de deposição, não desperdiça metal de solda e normalmente é um processo facilmente automatizado. As variações de tensão, corrente, forma da união, influenciam nas propriedades mecânicas da solda. Os ajustes de variáveis são definidos aprofundando-se na análise dos chanfros para elucidar a melhor técnica de soldagem para chapas de aço ASTM-A36 com espessura de 12,7 mm (POLINSKI, PARIS, 2014).

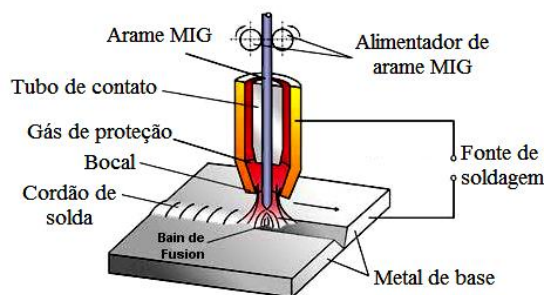


Figura 1. Esquema ilustrativo da soldagem MIG/MAG (http://epa.soudage.free.fr/tig/procede_mig.JPG).

2.2. Parâmetros do processo de soldagem dos aços ASTM A36

Segundo Moreira (2008), os aços estruturais ASTM A36 dependendo da composição química, dos procedimentos/parâmetros de soldagem empregados e da taxa de resfriamento pode se tornar susceptível a um ou mais problemas de soldabilidade. Para Novais (2010), as descontinuidades mais comuns na soldagem desses aços são as descontinuidades geométricas, geradas na etapa de montagem e de soldagem. Os exemplos mais comuns são falta de fusão, falta de penetração, mordedura, desalinhamento, superposição, deposição insuficiente.

Na soldagem MIG/MAG a eficiência, a confiabilidade e a qualidade da solda estão relacionadas com os seguintes parâmetros: Corrente de soldagem; tensão do arco elétrico; DBCP; velocidade de soldagem; taxa de deposição; vazão do gás auxiliar de proteção, indução (que na transferência metálica por curto-circuito interfere na quantidade de respingo) e ângulo da tocha. Os parâmetros citados são responsáveis pela forma de transferência metálica, pelo nível de respingo gerado e estabilidade do arco que interferem diretamente nas características e propriedades mecânicas da junta soldada (MARTINS, 2008). Neste trabalho avaliam-se, especificamente, os parâmetros de tensão e corrente do arco elétrico e velocidade de soldagem.

A **tensão** afeta tanto o modo de transferência metálica quanto à geometria do cordão. A tensão tem uma influência direta no comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos. Quando a tensão do arco diminui, a penetração aumenta. Quando a tensão aumenta, o comprimento do arco também aumenta, aumentando assim, a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras (MARTINS, 2008).

A **intensidade da corrente** influencia diretamente o modo de transferência metálica e o controle da taxa de fusão do eletrodo. O emprego de eletrodos de materiais resistivos como o aço não ligado, com baixas correntes, apresenta uma relação linear entre a intensidade de corrente e a velocidade de alimentação; entretanto, à medida que a intensidade de corrente aumenta, essa relação se modifica, tendendo para uma curva, especialmente no caso de arames com diâmetro menor. Isto acontece devido ao efeito Joule, responsável pelo calor na ponta do eletrodo, e que influencia de modo significativo a taxa de fusão. Aumentando-se a intensidade de corrente e mantendo-se constantes as outras variáveis, o cordão de solda apresenta aumento de penetração e de largura (FEDELE, 2002, INFOSOLDA, 2016).

A **velocidade de soldagem** influencia na energia de soldagem, ou seja, na quantidade de calor cedido à peça, como também na penetração. Uma velocidade de soldagem muito baixa gera grandes aportes térmicos, podendo o material sofrer mudanças não desejadas em suas microestruturas. Quando se trata de soldagem com arames tubulares com fluxo

não metálico, baixas velocidades de soldagem dificultam o controle da escória que pode passar a frente da poça de fusão e gerar inclusões de escória (ARAÚJO, 2005).

Segundo Martins (2008), a microestrutura de uma junta soldada de um aço deve apresentar propriedades similares a do metal de base, ou seja, o metal de solda e a zona termicamente afetada devem apresentar propriedades similares a uma chapa que sofreu um tratamento termomecânico para desenvolver as propriedades mecânicas desejadas. Logo, o conhecimento da dependência entre a microestrutura final e alguns parâmetros ligados à soldagem é muito importante.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e equipamentos

Neste trabalho utilizou-se, como material de base, o aço de classificação ASTM Grau A36 (NBR 6648/6650/7007), correspondendo ao aço do tipo estrutural, em forma de chapas com dimensões de 200 mm x 100 mm x 12 mm (comprimento x largura x espessura), com bisel de 30° para junta em “V” e em “X”, como mostra a Fig. (2). Aos pares essas peças geraram os corpos de prova a serem soldados, cuja composição química e propriedades mecânicas são apresentadas nas Tab. (1).

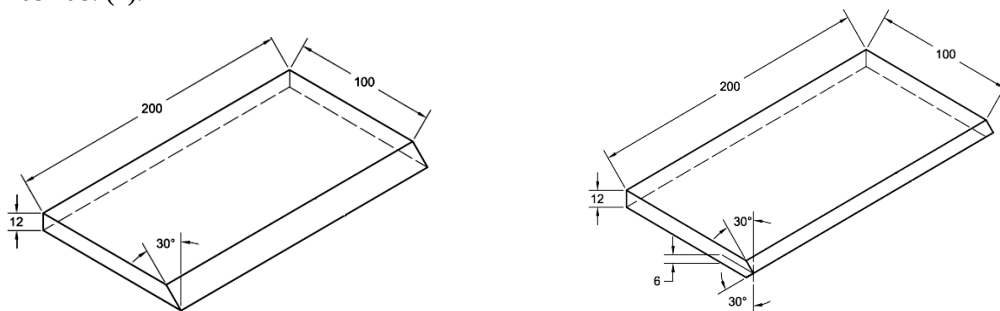


Figura 2. Esquema ilustrativo das chapas biseladas para formação dos chanfros em “V” e “X” respectivamente.

Tabela 1. Composição química (% máximo em peso) e propriedades mecânicas do aço ASTM A36.

Composição	C	P	S	Si	Cu
% Máximo	0,26	0,04	0,05	0,40	0,20
Propriedade Mecânica	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento	Ceq < 0,30	
	250 (mín.)	400 – 550	20 %		

Como consumível, foi utilizado o arame sólido, de diâmetros 1,2 mm, norma AWS A 5.18, do tipo ER70S-6, protegido com a mistura gasosa Ar + 25%CO₂. A composição química e propriedades mecânicas do arame sólido é mostrado na Tab. (2).

Tabela 2. Composição química (% em peso) dos arames sólido e tubular fornecidos pelo fabricante ESAB

Composição	C	Si	Mn	P	S
ER70S-6	0,08	0,90	1,50	-	-
Propriedade Mecânica	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento	Ceq < 0,30	
	470	560	26 %		

Foi utilizada uma fonte de soldagem modelo LAI 400 e ângulo de soldagem da tocha de 90°. Variou-se a velocidade de alimentação do arame e conseqüentemente a corrente de soldagem. A DBCP foi mantida constante em 16 mm. No início de cada teste, o valor desejado da velocidade de alimentação do arame era ajustado através de um potenciômetro ligado ao alimentador de arame e, em seguida, promovia-se o ajuste do comprimento do arco através da variação da tensão fornecida pela fonte de soldagem. Desta forma definiu-se os parâmetros de soldagem utilizados nos experimentos. O cabeçote alimentador de arame MEF 30R, para soldagem semiautomatizada ou mecanizada, possibilitou a soldagem com controle contínuo de tensão, permitindo uma velocidade do arame de 1,5 a 22 m/min e diâmetro do arame de até 1,60 mm. Especificações técnicas: Corrente nominal (A): 300; Corrente de soldagem (A): 400 – 300; Tensão em carga convencional (V): 34 – 29.

O processo de soldagem foi automatizado objetivando-se boa repetibilidade dos parâmetros de soldagem. O Objetivo foi alcançado com a utilização de um suporte para a tocha de alimentação do arame sólido, fixado em uma máquina de corte do tipo MR 36 (tartaruga), de fabricação da White Martins, com os metais de base dispostos em um gabarito fixo na mesa de soldagem como mostra a Fig. (3).

Os demais equipamentos utilizados serviram para o corte das amostras a serem analisadas metalograficamente e para o ensaio de dobramento, entre eles: 1. Para retirada dos corpos de prova da junta soldada foi utilizada uma serra de

fita marca S. Ramos, modelo 260 e os cortes foram executados em sentido transversal ao cordão da solda; 2. Para preparação das amostras foi utilizado uma lixadeira metalográfica marca Arotec, modelo Aropol E usando uma sequência de lixas de 120 a 1200 meshes; 3. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um microdurômetro digital de bancada HMV SHIMADZU, MODELO MICROHARDNESS TESTER HV – 1000 com endentador piramidal de diamante; 4. Um microscópio óptico marca NIKON, modelo ECLIPSE LV100 com aumento máximo de 1500 vezes foi utilizado para obtenção das imagens.



Figura 3. Foto ilustrativo do arranjo utilizado para realização das soldagens em “V” e “X”.

3.2. Metodologia

Para a busca das condições adequadas de soldagem, primeiramente foram realizados ensaios de simples deposição, em chapas de aço ASTM A36, com os parâmetros de corrente, tensão e velocidade de soldagem sofrendo variações. Porém, a corrente e a tensão sofreram variações dentro do campo de valores previsto pelo catálogo do fabricante dos consumíveis. Estes ensaios serviram para selecionar os cordões de solda com melhores características dimensionais e de acabamento (homogeneidade do cordão, quantidade de respingos e forma da escória) que se adaptaram ao passe de raiz, enchimento e acabamento. Após esta análise inicial novos ensaios de deposição foram realizados para que se ajustasse essa condição a condição real de soldagem e proporcionasse juntas soldadas livres de discontinuidades. Os corpos de prova (CP) soldados podem ser vistos na Fig. (4) e seus parâmetros na Tab. (3).



Figura 4. Foto dos CP's MX e MV, respectivamente, após soldagem.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem

CP	Condição	U (Volts)	A (Ampères)	Vs (mm/min)	E (KJ/mm)
MX1	P1	17	120	125	1,0
MX2	P1	18,8	192	125	1,7
MV1	Raiz	16,8	112	125	0,9
	P1	20,8	184	125	1,8
MV2	Raiz	17,2	112	125	0,9
	P1	18,8	188	125	1,7

Todas as soldagens foram realizadas na posição plana e foram mantidos constantes: o ângulo da tocha em 90°, o sentido de soldagem puxando, DBCP em 16 mm e a vazão de gás em 10 l/min. De cada CP soldado foram retirados 02 (dois) corpos de prova para avaliação do dobramento e um para microdureza, microestrutura, penetração e largura dos cordões, como mostrado na Fig. (5).

Para as condições estabelecidas neste trabalho foi adotada a seguinte nomenclatura: CP = corpo de prova na condição como soldado; Vs = velocidade de soldagem; A = amperagem; E = energia de Soldagem; U = tensão, MX = CP soldado com chanfro em “X”; MV = CP soldado com chanfro em “V”; Raiz = Passe de raiz; P1 = Cordão de solda.

As chapas para o chanfro em “V” foram ancoradas com cantoneiras na parte oposta ao chanfro, do lado da raiz, como mostrado na Fig. (6). As cantoneiras foram soldadas com eletrodo revestido (eletrodo E6013) com quatro cordões cada, deixando um espaço no meio, correspondente ao passe de raiz da junta. Esse procedimento visa garantir a restrição e evitar deformações do conjunto durante a solidificação dos cordões de solda. Durante a soldagem das cantoneiras foram usados dois espaçadores de espessura 1,5 mm correspondentes a abertura de raiz requerida. Foram utilizadas ainda duas chapas que auxiliaram no início e no final da soldagem.

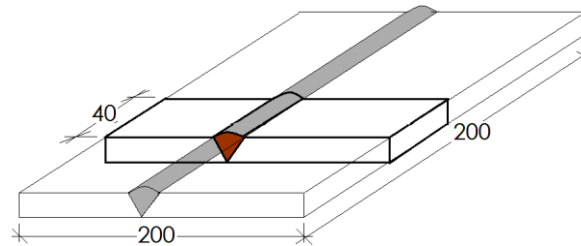


Figura 5. Esquema ilustrativo das dimensões e localização das amostras em “V” e “X” para o ensaio de dobramento.



Figura 6. Chapas soldadas em V, mostrando na parte de baixo as cantoneiras de ancoragem e nas laterais as chapas de início e fim da soldagem

A preparação metalográfica dos corpos de prova para análise microscópica foi realizada de maneira convencional, por lixamento com lixas de granulometria variando de 100 a 2000 mesh e polimento com alumina de 1mícron e 1/4 de mícron. O ataque químico foi feito com nital a 2% e a análise microscópica realizada por microscopia ótica objetivando avaliar qualitativamente a microestrutura do passe de acabamento na região da zona fundida (ZF).

Para o ensaio de microdureza foi adotado o método Vickers, sendo o ensaio realizado conforma a norma ASTM E384 (Martins, 2008), onde os corpos de prova para este ensaio foram os mesmos usados na análise metalográfica. Em cada corpo de prova foram traçados 7 pontos de impressão aleatória de dureza na ZF, na ZTA e no MB como mostra o esquema ilustrativo da Fig. (7).

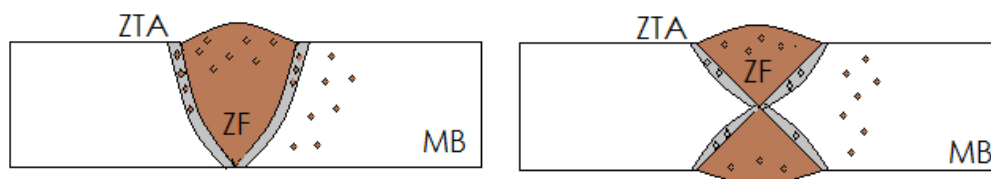


Figura 7. Esquema ilustrativo das juntas soldada em “V” e em “X” para ensaio de microdureza.

As chapas para o chanfro em X foram ancoradas através do dispositivo mostrado na figura abaixo que consiste em duas placas robustas que comprimem as chapas a serem soldadas através dos apertos de parafusos e porcas. A soldagem pode ser feita através da janela de ambos os lados, sendo um cordão feito de cada lado alternadamente. A abertura da raiz foi mantida em 1,5 mm. Esse dispositivo permitiu a soldagem de ambos os lados, sem deformações e garantindo a restrição desejada como mostrado na Fig. (8).



Figura 8. A figura mostra o CP soldado no dispositivo de fixação.

Para a confecção dos CPs foram considerados as orientações contidas na Norma AWS D1.1/D1.1M:2010 para qualificação de juntas a serem soldadas. Para os CPs com junta de topo e chanfro em “V” considerou-se o ângulo do chanfro em 60°, abertura da raiz de 1,5 mm e altura do nariz de 2,0 mm, sem uso de cobre junta. Os CPs com chanfro em “X” foram preparados com junta de topo, ângulo do chanfro de 60°, abertura da raiz de 1,5 mm e altura do nariz de 2,0 mm. As energias de soldagem para os passes de raiz foram os mesmos nos dois tipos chanfro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Microscopia óptica

A microscopia óptica foi empregada para a análise qualitativa da microestrutura da ZF, ZTA e MB e a classificação dos microconstituintes seguiu o sistema adotado pelo IIW (Instituto Internacional de Soldagem). As Figs. (9), (10) e (11) exibem o comportamento microestrutural do MB, ZF e ZTA respectivamente. Pode-se observar que a microestrutura do MB exibiu basicamente uma matriz de ferrita (em branco) com veios de perlita (tom escuro).

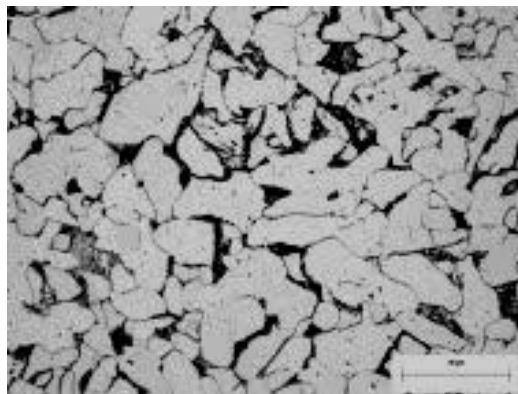


Figura 9. Microestrutura do MB. Ampliação 750X. Ataque Nital 2%.

Na ZF as análises são feitas no último cordão das juntas soldadas, em cada CP, para cada condição de soldagem estabelecida. Observando-se a microestrutura da ZF, mostrada na Fig. (10), percebe-se que, independentemente da energia de soldagem aplicada, ocorre a presença de ferrita de contorno de grão (PF(G), veios ou grãos poligonais), ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita poligonal intergranular (PF(I)) e ferrita acicular (AF) em termos de classificação IIW e presentes em todos os corpos ensaiados.

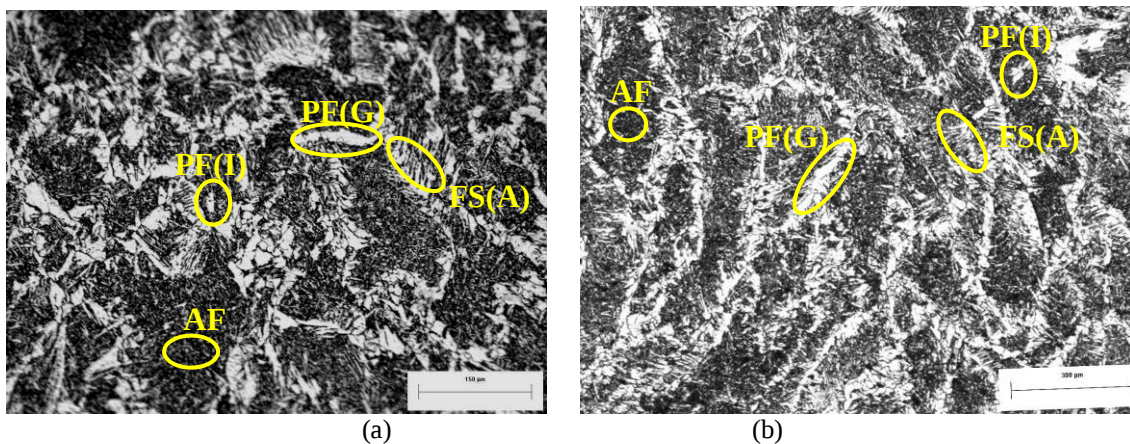


Figura 10. Microestrutura da ZF. (a) MV típico; (b) MX típico. Ampliação 150X. Ataque Nital 2%.

A presença da AF na ZF está relacionada a presença de elementos de liga formador e estabilizador deste microconstituente, como o Mn, oriundo da composição química do arame eletrodo. Embora a PF(G) não seja muito frágil pode favorecer a propagação de trinca por ser um microconstituente que geralmente se encontra entre microestruturas de maior resistência e maior fragilidade que não suportam deformações decorrentes de grandes concentrações de tensões. A AF constitui-se como microconstituente mais desejável para prevenir trincas devido ao fato de que os finos grãos da AF e os contornos de alto ângulo favorecem uma boa resistência à ocorrência dessas trincas.

Na zona fundida dos CPs não foi constatada a presença de trinca, entretanto, observou-se a falta de fusão, principalmente no passe de raiz (MV1 e MV2) e no centro dos CP's MX1 e MX2, além de porosidade em todos os corpos ensaiados, constituindo-se como descontinuidades geométricas descritas por Novais (2010).

Na Figura (11) são apresentadas as microestruturas da região ZTA. Pelo que pode ser observado nas microscopias óticas as ZTA dos dois chanfros utilizados, são bastante semelhantes. A microestrutura apresenta-se heterogênea devido a presença de diferentes microestruturas, com maior incidência dos seguintes microconstituintes: PF(G) e FS(A). Na zona termicamente afetada (ZTA) também existem grãos de perlita e ferrita. No entanto, devido ao calor, estes grãos são menores que os encontrados no MB.

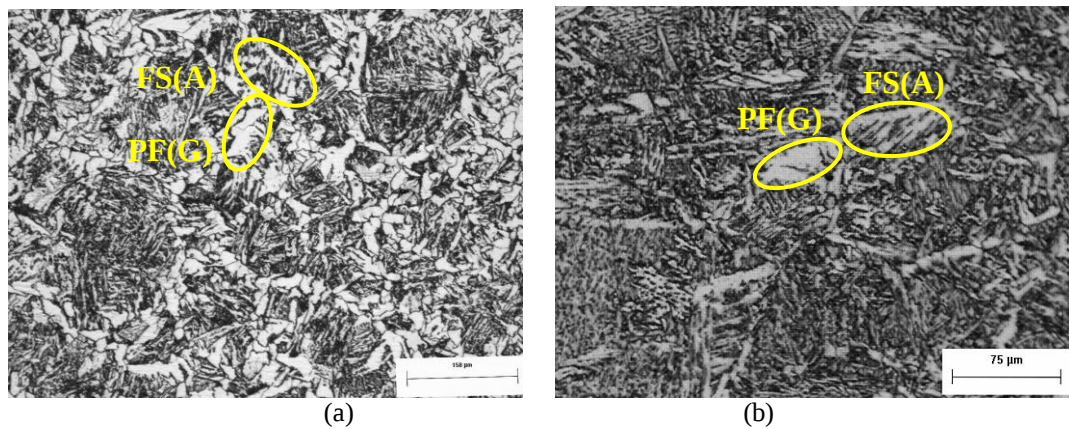


Figura 11. Microestrutura da ZTA. (a) MV típico; (b) MX típico. Ampliação 150X. Ataque Nital 2%.

Não foi detectado nenhuma trinca nesta região. A presença de PF(G) e FS nessa região, segundo Bubnoff, Ventrella (2002), oferecem baixa resistência a propagação de trincas prejudicando a tenacidade e a resistência mecânica da junta soldada. Segundo Martins (2008), a presença da FS(A) é prejudicial à resistência por clivagem o que facilita a propagação da trinca. Isto se deve ao fato de que esta microestrutura não possui contornos de alto ângulo entre as placas. Segundo Bubnoff, Ventrella (2002) a elevação na energia de soldagem decorrente dos passes subsequentes ao de raiz promoveram aumento de PF(G). Com a elevação da temperatura mantida praticamente constante a energia de soldagem elevou o percentual de PF(G), havendo em ambos os casos a ocorrência da redução no percentual de AF (MV1 e MV2), por isso não são verificadas nas microestruturas da ZTA apresentadas, sendo isto uma consequência da redução da taxa de resfriamento da ZF com a elevação dos parâmetros citados, onde as taxas lentas de resfriamento induzem a difusão do carbono que promove a nucleação de ferrita primária nos contornos dos grãos gerando PF(G).

4.2. Microdurezas

A Figura (12) mostra a tendência do comportamento da microdureza nas diferentes regiões do chanfro “X” e “V”. Esta tendência mostra que a dureza da ZF foi maior do que a dureza nas demais regiões. Da análise do comportamento das microdurezas apresentadas se observa uma dureza média na ZF entre 205 Hv (“V”) e 217 Hv (“X”), na ZTA entre 194 Hv (“V”) e 209 Hv (“X”) e no MB da ordem de 172 Hv. Os valores entre parênteses mostrados na Fig. (12) correspondem aos desvios padrões. Na figura são mostrados os valores médios de microdureza dos passes de Raiz (“X”) e P1 (“V”). Da análise individual de cada tipo de chanfro verifica-se que com as energias de soldagem empregadas (MV) e número de passes houve um refinamento de um passe pelo subsequente, proporcionando uma taxa de resfriamento baixa e, com isto levando ao aumento da dureza e aumento na resistência mecânica da junta, o que é desejável nos aços A36, cujo principal objetivo é possuir alta resistência aliada a boa tenacidade.

Entretanto, quando se compara o comportamento da dureza no chanfro “X”, mais alta em relação ao “V”, deduz-se que o aumento progressivo da energia de soldagem e o número maior de passes no chanfro em “V” proporcionaram uma redução na taxa de resfriamento, causando aumento do tamanho de grão na ZTA com consequente queda de dureza nesta região comparativamente ao chanfro “X”. De acordo com Chiaverini (2002), a presença do Si no MB e mais a presença deste elemento conjuntamente com o Mn na composição química do consumível, nos teores apresentados para este aço, contribuem para um aumento em sua dureza e resistência mecânica. O cobre, que forma partículas metálicas dispersas, contribui para o endurecimento do aço. Estes elementos provocam alterações na microestrutura e propriedades mecânicas dos aços.

A avaliação individual da microdureza mostrou picos de alta e baixa dureza, que se atribui a presença de fases isoladas com elevada dureza. As temperaturas mais altas decorrentes das energias mais altas foram suficientes para gerarem o aparecimento de PF, que pode ter provocado pontos de baixa dureza localizada. Desta análise conclui-se que é primordial o controle do aporte térmico na soldagem multipasse e isto nos indica que a soldagem com o chanfro em “V” ser a mais indicada para a soldagem do aço em questão quanto a dureza. Mesmo ocorrendo variações de dureza nas diferentes regiões da solda (ZF, ZTA e MB), com a zona de fusão apresentando valores mais elevados, provavelmente pela presença nessa região de agregados de ferrita com carbonetos (FC) incluindo perlita FC(P). Um dos procedimentos que pode alterar a dureza é o aumento da energia de soldagem (ou aporte térmico) fornecida ao processo, durante a soldagem, a fim de diminuir a taxa de resfriamento e com isso favorecer a formação e microconstituintes finais com menor dureza. Com o aumento da energia de soldagem e a consequente diminuição da taxa de resfriamento,

há a tendência da formação de uma ZTA maior, porém apresenta microconstituintes de menor dureza. Em aços de baixo carbono, comprovam-se a redução da dureza com o aumento dessa energia. Os valores de dureza são compatíveis ao aço ferrítico A-36 e ao metal de adição produzido com o arame ER70S-6 utilizado na soldagem MIG/MAG.

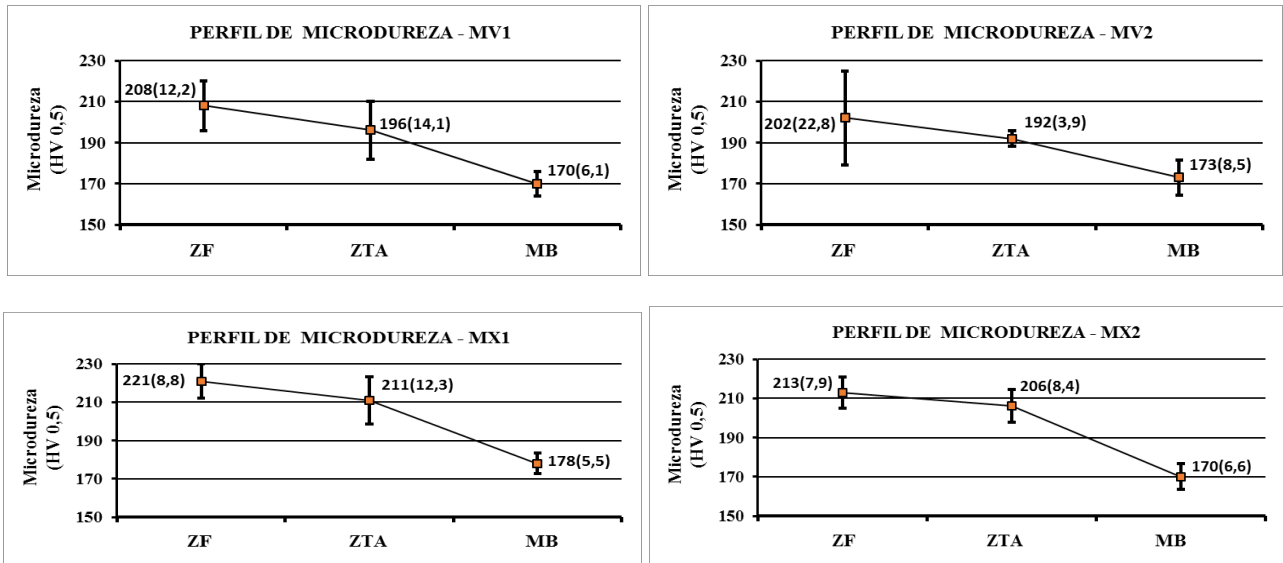
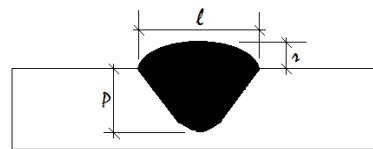


Figura 12. Perfil de microdureza dos corpos de prova ensaiados.

4.3. Geometria do cordão – penetração e largura

De acordo com a Tab. (3) se pode notar que os CP's com maiores valores de tensão apresentaram maiores larguras do cordão de solda, entretanto, reduziu o reforço e a penetração. Dos tipos de chanfro testados, o em "V" apresentou largura (ℓ) do cordão final maior que o em "X". Porém, no chanfro em "X" o reforço (r) foi maior que no chanfro em "V". Esse deveu-se basicamente ao fato de que no chanfro em "X" foi usado apenas um cordão de solda, Fig. (13).



CP	ℓ (mm)	r (mm)
MX1	9	2,0
MX2	14	3,0
MV1	14	1,5
MV2	13	1,5

Figura 13. Geometria do cordão de solda. Penetração e largura.

A macrografia da seção transversal mostrou que houve penetração nas laterais do chanfro, produzindo largura e reforço, entretanto, a penetração não foi adequada no passe de raiz e, não foram observadas descontinuidades tipo trincas. Os resultados obtidos da análise de geometria dos cordões de solda mostraram que somente a energia de soldagem contribuiu para as variações na geometria do cordão (sendo que a velocidade de soldagem não foi considerada o parâmetro mais significativo devido ao fato de ter sido mantida constante), devido a variação da quantidade de material depositado em virtude da variação da velocidade de alimentação do arame durante os ensaios de soldagem.

4.4. Dobramento

Independentemente do tipo de chanfro utilizado constatou-se a falta de fusão nos CP's ensaiados como mostra a Fig. (14). Nos ensaios de dobramento de face (Fig. (15)), todos os corpos de prova ensaiados foram reprovados. Todos abriram trinca antes de atingir 180° evidenciando a fragilidade da junta soldada nessas condições, principalmente devido à falta de fusão. Isto porque esta região passou a se comportar como um concentrador de tensão no momento do ensaio. A fratura se deu sobre a região de ligação ZF/MB. O ensaio de dobramento transversal de face é caracterizado pelo fato da solda ser transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova, de forma que a face da solda se torna a superfície convexa do corpo de prova dobrado, de acordo com QW-161.2. As dimensões dos corpos de prova fabricados seguiram as medidas determinadas pelo QW-462.3.a, conforme é mostrado na Fig. (5).

É possível visualizar que os valores de carga máxima suportada durante o teste de dobramento frontal (Fig. (15)) apresentaram tendência de aumento do início da região da falta de fusão para o final da solda. Observa-se também que os valores de carga máxima suportada pelos CP's foram sempre maiores para as soldas feitas com chanfro em "X". Os valores entre parênteses mostrados na Fig. (15) correspondem aos desvios padrões. Na figura são mostrados os valores médios das cargas máximas aplicadas no ensaio de dobramento.

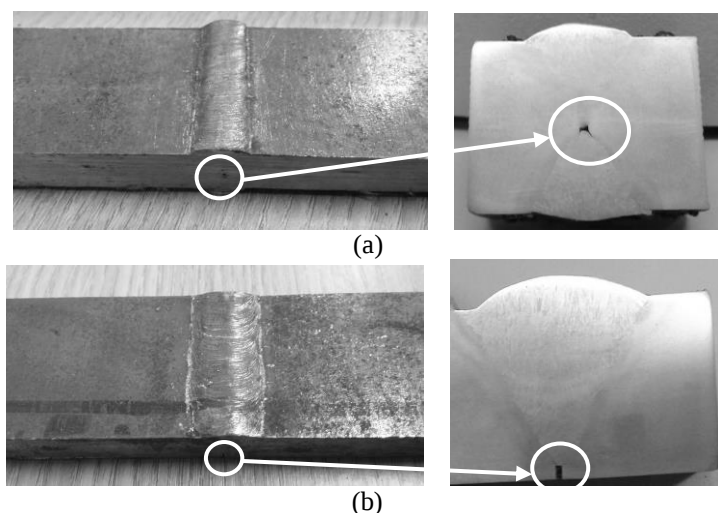


Figura 14. Perfil do cordão de solda “MX” e “MV” apresentando falta de fusão nos pontos em destaque.



Figura 14. Corpos de prova dobrados e que apresentaram trinca ou se romperam.

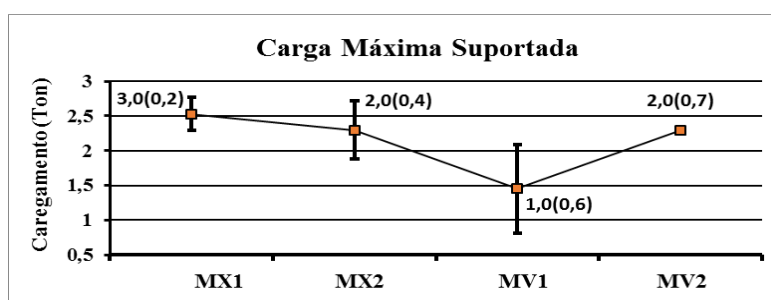


Figura 15. Cargas máximas suportadas pelos cordões de solda “MX” e “MV”.

5. CONCLUSÃO

A análise microestrutural do material mostrou que o MB exibiu uma matriz de ferrita com veios de perlita e a ZTA e ZF são constituídos basicamente de ferrita primária (PF), ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita acicular (AF) e ferrita com segunda fase (FS), com maior presença de ferrita acicular (AF), devido ao ciclo térmico gerado, influenciando diretamente na taxa de resfriamento das amostra.

Os ensaios mostraram que a microdureza encontrada na ZF foi maior que nas demais regiões devido ao aumento da energia de soldagem nos passes subsequentes (Chanfro “V”) fazendo com que a dureza média da ZTA decrescesse, uma vez que a velocidade de resfriamento fosse menor nestas condições.

Quanto à geometria do cordão de solda a altura decresceu à medida que a tensão, a corrente e a velocidade de soldagem cresceram. A largura também diminuiu com o aumento dos parâmetros de soldagem. No entanto, sua relação com a variação de tensão é parabólica. A penetração diminuiu à medida que a tensão, corrente e velocidade de soldagem aumentam.

As descontinuidades apresentadas na junta soldada influenciaram nos baixos resultados apresentados nos ensaios de dobramento.

6. AGRADECIMENTOS

Ao IFMA, Campus Monte Castelo pelo financiamento desta pesquisa, À São Marcos Manutenção Industrial e Naval pela preparação dos corpos de prova e ao SENAI pela realização dos ensaios mecânicos.

7. REFERÊNCIAS

- Araújo, M. R. V. et al., 2005. "Microstructural analysis of submerged-arc weldment in low-carbon steel by scanning electron microscopy. Brazilian Journal of Morphological Sciences", Campinas, v. 22, n. (Suppl.), p. 355-356, 2005.
- AWS D1.1/D1.1M. 2004., "Structural Welding Code – Steel". Miami: American Welding Society, 2004.
- Bubnoff, D. V., Ventrela, V.A., 2002. "Efeito da tensão do arco elétrico em soldagem por arame tubular com eletrodo aws e-81t1-ni1 na microestrutura do metal de solda. Cbecimat.
- Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos 7. ed. São Paulo: Editora da ABM, 2002.
- Cimm, 2016., "Classificação ASTM", disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6337_Classificacaodosacosestruturaiscodigosdeidentificacao#.VKbv6SvF9w5>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- Fedele, R. 2002. "Soldagem de tubulações: metalurgia, procedimentos e desafios". Metalurgia & Materiais, v.58, n.52.
- Infosolda. 2016., "Processo de soldagem mig-mag", disponível em:< <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/349-processo-mig-mag.html>>. Acesso em 17 abr.2016.
- Martins, W. P., 2008, "Influência dos parâmetros de soldagem na microestrutura e propriedades mecânicas de juntas soldadas em aços de alta resistência e baixa liga soldadas pelo processo arame tubular". São Luís. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, Maranhão.
- Moreira, A. F., 2008, "Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW". Dissertação de Mestrado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2008.
- Novais, Paulo R. Santos de., 2010, "Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções". Construmetal – Congresso latino-americano da construção metálica, São Paulo, 2010
- Polinski, E.L. ; Paris, A.F.D. 2014., "Análise da influência de chanfros em soldagem de chapas grossas com o processo de arco submerso". in: cricte 2014 - xxvi congresso regional de iniciação científica e tecnológica em engenharia, 2014, alegrete. cricte 2014, 2014.
- Trimetais., 2016., "o que é aço A36?", disponível em:< <http://trimetais.com.br/materiais/aco-a36/>>. Acesso em 17 abr.2016.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CHANFER GEOMETRY INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES OF A STRUCTURAL STEEL ASTM A36 WELDING WITH THE GMAW PROCESS

Jacilene de Jesus Costa, jacilenecostha@hotmail.com¹
 Paulo Victor Cunha Caetano, paulocaetano.pc@gmail.com¹
 Waldemir dos Passos Martins, waldemir@ifma.edu.br¹
 Carmem Célia Francisco Nascimento, carmemfn@ifma.edu.br¹
 Valdemar Silva Leal, valdemar@ifma.edu.br¹

¹IFMA – Instituto Federal do Maranhão/ Campus Monte Castelo. Av. Getúlio Vargas, 04. CEP:65030-005. São Luís/MA.

Abstract. Prevention of deformations and discontinuities in welds is of fundamental importance and is due to the dimensional and geometric tolerances are increasingly strict specifications of welded structures projects, motivating welding experts to develop increasingly stable processes with a view the quality of welding guarantees. Thus, a well defined groove is of paramount importance to ensure the integrity of welded structures, and in particular those made of steel, since most of these materials when subjected to welding become susceptible to the appearance of deformations and cracks. Thus, this work presents a study of the influence of the groove geometry in the metallurgical properties, geometric and mechanical behavior of structural steel ASTM A36 welded by GMAW processes. It used the solid wire AWS ER70S-6 SFA 5:18 coppered diameter 1.2 mm, with the shielding gas the mixture Ar + 25% CO₂. The specimens were welded with two different types of chamfer in "V" and "X", and the analyzed properties were bending, the microstructure, hardness, penetration and width of the beads. This study was possible to determine the influence of the type chamfer used and the prediction of the integrity of welded joints of structural steels, as the appearance of deformations and discontinuities.

Keywords: gmaw, chamfer, mechanical properties, bead geometry